

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky – Katedra elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Lukáš Molinek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky – Katedra elektroniky

**Inovace laboratorní úlohy s univerzálním motorovým
systémem**

Innovation of Laboratory Measurement with Universal Motor's System

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Molinek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Inovace laboratorní úlohy s univerzálním motorovým systémem**
Innovation of Laboratory Measurement with Universal Motor's System

Zásady pro vypracování:

1. Popište asynchronní, synchronní a stejnosměrný motor a jejich příslušné napájecí měniče.
2. Proved'te obvodové zapojení univerzálního motorového systému a jeho začlenění do Laboratoře výkonové elektroniky.
3. Vytvořte laboratorní úlohu s univerzálním motorovým systémem.

Seznam doporučené odborné literatury:


Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 2 - Měniče s vnější komunikací. Plzeň: ZČU 1994.
Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 3 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Plzeň: ZČU 1998.
Rashid, M. H.: Power Electronics Handbook. Pensacola, Florida 2001.
Bose, B., K.: Modern Power Electronics and Ac Drives. Prentice Hall, 2002.
Hughes, A.: Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Application. Burlington 2006.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce teoreticky popisuje různé typy elektromotorů a typy napájecích měničů, které se společně využívají. Teoretická část je tak rozdělena do dvou rozsáhlých kapitol, kde každá se zabývá právě jedním z těchto pojmů. Další kapitolu tvoří praktická část, která popisuje použitý univerzální motorový systém a představuje tři laboratorní úlohy, které je možno na tomto systému praktikovat. Každé měření je doplněno závěrem, ve kterém jsou popsány výsledky, kterých bylo dosaženo.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektromotor, měnič, mechanická charakteristika, moment, resolver, rotor, stator

ABSTRACT

This thesis deals with different types of electromotors and types of voltage converters, which are used professionally. Theory part is divided into two extensive chapters, where each of them apply to one of these terms. Subsequent chapter deals with practical part of this thesis, which describes usage of general-purpose motor system and introduces three laboratory exercises, which are applicable on this system. Each of measurements is followed by conclusion, which describes measured and calculated results.

KEYWORDS

electric motor, converter, transformer, mechanical characteristics, momentum, resolver, rotor, stator

MOLINEK, Lukáš. *Inovace laboratorní úlohy s univerzálním motorovým systémem*: bakalářská práce. Ostrava: Vysoká škola báňská, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektroniky, 2013. 73 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Vaculík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Ostrava

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petru Vaculíkovi Ph.D. za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

Ostrava

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Teoretické vymezení pojmu Motory	12
1.1 Historie motorů	12
1.2 Motory obecně	12
1.3 Pracovní režimy motorů	14
1.4 Rozdělení elektromotorů	14
1.4.1 Podle druhu proudu	14
1.5 Základní parametry a pojmy	15
1.6 Stejnosměrný motor	16
1.6.1 Konstrukce stejnosměrného motoru	17
1.6.2 Princip činnosti	17
1.6.3 Vybrané typy stejnosměrných motorů	18
1.7 Asynchronní motor	24
1.7.1 Motor nakrátko	24
1.7.2 Motor s kroužkovou kotvou	27
1.7.3 Princip činnosti asynchronních motorů	28
1.7.4 Mechanická charakteristika asynchronního motoru	30
1.7.5 Regulace otáček asynchronního motoru	32
1.7.6 Brzdění asynchronního motoru	34
1.8 Synchronní motor	34
1.8.1 Základní rozdělení synchronních motorů	35
1.8.2 Uložení permanentních magnetů na povrchu rotoru	36
1.8.3 Uložení permanentních magnetů uvnitř rotoru	36
1.8.4 Mechanická charakteristika synchronního motoru	38
2 Teoretické vymezení pojmu Měniče	40
2.1 Napájecí měniče elektromotorů	40
2.2 Pulzní měniče (DC/DC měniče)	41
2.2.1 Snižování napětí	42
2.2.2 Zvyšování napětí	43
2.2.3 Vícekvadrantové spojení pulzního měniče	44
2.3 Napěťový střídač (DC/AC měnič)	46
2.3.1 Jednofázový můstkový střídač	46
2.3.2 Trojfázový střídač	47
2.4 Usměrňovač (AC/DC měnič)	48
2.4.1 Jednocestný usměrňovač	49

2.4.2	Dvoucestný usměrňovač	49
3	Praktická část	51
3.1	Měření asynchronního motoru se střídačem	51
3.1.1	Zadání měření	51
3.1.2	Blokové schéma	52
3.1.3	Měření na motorovém systému	53
3.1.4	Měření asynchronního motoru naprázdno	56
3.1.5	Měření asynchronního motoru se zátěží	58
3.2	Měření stejnosměrného motoru s pulzním měničem	62
3.2.1	Zadání měření	62
3.2.2	Blokové schéma	62
3.2.3	Měření - úkol 1	63
3.2.4	Měření - úkol 2	66
3.3	Měření čidla RESOLVER	70
3.3.1	Zadání měření	70
3.3.2	Schéma zapojení	70
3.3.3	Princip činnosti	71
3.3.4	Zavěr měření	71
3.4	Přístroje použité při měřeních	71
4	Závěr	72
	Literatura	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Konstrukce SS motoru. [11]	13
1.2	Pohyb pracovního bodu v kvadrantech [5]	13
1.3	Princip činnosti stejnosměrného motoru. [1]	17
1.4	Schéma obvodu motoru s cizím buzením [1]	19
1.5	Schéma obvodu motoru s paralelním buzením [7]	20
1.6	Schéma obvodu motoru se sériovým buzením [1]	21
1.7	Schéma obvodu kompaundního motoru [1]	21
1.8	Regulace otáček derivačního motoru. [1]	22
1.9	Mechanické charakteristiky SS cize buzeného motoru [5]	23
1.10	Mechanické charakteristiky SS cize buzeného motoru ve všech kvadrantech [5]	23
1.11	Asynchronní motor s kotvou nakrátko v řezu [7]	25
1.12	Klecová kotva	25
1.13	Zapojení do hvězdy (a) a trojúhelníku (b) [1]	25
1.14	Průběh točivého momentu [1]	26
1.15	Schématické uspořádání tří válcových cívek (a), Fázorový diagram napájecího proudu (b) [1]	29
1.16	Mechanická charakteristika asynchronního motoru [5]	30
1.17	Momentové charakteristiky pro různé odpory rotoru [5]	31
1.18	Frekvenční měnič s meziobvodem [1]	33
1.19	Synchronní motor s permanentními magnety [12]	35
1.20	S vyjádřenými póly (a), s hladkým rotorem (b) [5]	36
1.21	Rozložené permanentní magnety na povrchu rotoru - vlevo (a), Rozložené permanentní magnety uvnitř rotoru - vpravo (b) [5]	37
1.22	Mechanická charakteristika synchronního motoru [5]	39
2.1	Základní typy měničů [5]	40
2.2	Pulzní měnič pro snižování napětí, schéma [9]	42
2.3	Pulzní měnič pro snižování napětí, průběhy proudu a napětí [9]	42
2.4	Pulzní měnič pro zvyšování napětí, schéma [9]	43
2.5	Pulzní měnič pro zvyšování napětí, průběhy proudu a napětí [9]	44
2.6	Dvoukvadrantové spojení pulzního měniče [9]	45
2.7	Spínací diagram čtyřkvadrantového spojení pulzních měničů [9]	45
2.8	Schéma jednofázového můstkového střídače [5]	46
2.9	Výstupní obdelníkový průběh napětí [5]	47
2.10	Schéma trojfázového střídče [5]	47
2.11	Spínací charakteristika a průběh sdruženého a fázového napětí [5]	48
2.12	Jednocestný můstkový usměrňovač a jeho průběh [9]	49

2.13	Dvoucestný usměrňovač a jeho průběh [9]	50
2.14	Dvoucestný můstkový usměrňovač a jeho průběh [9]	50
3.1	Univerzální motorový systém	51
3.2	Asynchronní motor použitý k laboratorní úloze	51
3.3	Blokové schéma měření asynchronního motoru se střídačem	52
3.4	Změřené průběhy fázových proudů při rozběhu na 25 Hz (nahore) a 50 Hz (dole) spínací frekvence 10,6 kHz	53
3.5	Průběh napětí pro nízké spínací frekvence 5,3 kHz	54
3.6	Průběh napětí pro střední spínací frekvence 10,6 kHz	54
3.7	Průběh napětí pro vysoké spínací frekvence 15,9 kHz	55
3.8	Průběh fázového proud I_{R1} a napětí meziobvodu U_{DC} , při rozběhu motoru na prázdno	55
3.9	Závislost otáček na změně frekvence	57
3.10	Závislost otáček na změně odporu, 30Hz	58
3.11	Závislost otáček na změně odporu, 40Hz	59
3.12	Závislost otáček na změně odporu, 50Hz	60
3.13	Stejnoseměrný motor použitý pro tuto úlohu	62
3.14	Blokové schéma měření stejnosměrného motoru na pulzním měniči . .	62
3.15	Průběh napětí a proudu za usměrňovačem, střída 80%	63
3.16	Průběh napětí a proudu pro hodnotu střídý 70%	64
3.17	Průběh napětí a proudu pro hodnotu střídý 50%	64
3.18	Průběh napětí a proudu pro hodnotu střídý 20%	64
3.19	Průběh napětí a proudu pro náhlou změnu střídý z 20% na 80% . . .	65
3.20	Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 500 Hz, otáčky 2338 ot/min	66
3.21	Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 1 kHz, otáčky 2108 ot/min	67
3.22	Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 2 kHz, otáčky 1851 ot/min	67
3.23	Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 5 kHz, otáčky 1572 ot/min	68
3.24	Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 20 kHz, otáčky 1602 ot/min	68
3.25	Schéma resolveru a průběhy napětí [5]	70
3.26	Schéma měření resolveru	70

ÚVOD

Elektromotor, tedy zařízení sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou práci a stroj jímž se zabývá první kapitola, je znám již od roku 1873, kdy belgický konstruktér Zénobe Gramme objevil princip stejnosměrného motoru, jenž je tedy nejstarším typem motorů. Vynález střídavého motoru následoval dvanáct let poté, kdy nezávisle na sobě Galileo Ferraris a Nikola Tesla představili funkční model jednofázového střídavého motoru. Měnič, o kterém podrobně pojednává druhá kapitola, je zařízení sloužící ke změně parametrů elektrické energie. Prvním významným typem měničů byl mechanický měnič, který v roce 1891 představil Harry Ward Leonard jako součást svého Ward Leonardova soustrojí. [6]

Za těch 140 let došlo k mnoha inovacím i novým objevům v oblasti motorů i měničů, ale principy zůstaly podobné. Tématem této bakalářské práce je inovace univerzálního motorového systému, ověření jeho funkčnosti a možností měření. Motorový systém, na němž bude výzkum a měření prováděno, je složen ze tří motorů - stejnosměrného, asynchronního a synchronního, jenž jsou spojeny na jedné hřídeli.

První dvě kapitoly této práce se zabývají zpracováním teorie nezbytné pro kapitolu třetí - praktickou. První kapitola je tvořena teoretickým vymezením pojmů motory, je rozdělena na historii motorů a rozdělení motorů. Hlavní část této kapitoly se zaměřuje na samotné typy motorů, u kterých je popsáno především konstrukční řešení jednotlivých motorů, principy činnosti, vybrané typy, brzdění motorů a mechanické charakteristiky. Druhá kapitola je tvořena teoretickým vymezením pojmu měniče. Tato kapitola se zabývá jednotlivými typy měničů, které vyhovují jednotlivým motorům. Popsán je pulzní měnič, usměrňovač i střídač. U těchto typů měničů je vysvětlen princip činnosti, rozdělení a využití měničů. Třetí kapitola je tvořena praktickou částí této bakalářské práce a zabývá se především ověřením funkčnosti motorového systému a poté samotnými měřeními na jednotlivých motorech, na kterých budou prováděna různá měření s využitím toho, že všechny tři motory jsou spojeny na jedné hřídeli. Nakonec se kapitola bude zabývat samotným vyhodnocením jednotlivých měření. Závěr práce zohledňuje, čeho mělo být a čeho bylo docíleno.

1 TEORETICKÉ VYMEZENÍ POJMU MOTORY

1.1 Historie motorů

První poznatky jsou zaznamenány z roku 1821, ve kterém Michael Faraday objevil elektromagnetickou indukci. Michael Faraday byl anglický fyzik a chemik, který se zasloužil o mnoho vynálezů, kterými jsou například transformátor, dynamo nebo zmiňovaný elektromotor. Hovoří o tom že, při změně magnetického pole protínajícího elektrický obvod (například proto, že se v něm obvod pohybuje), vzniká v obvodu elektrický proud. Naopak, pokud obvodem, jako je cívka v magnetickém poli, prochází proud, obvod se začne pohybovat a cívku je možné roztočit. Tyto dva uvedené jevy jsou základním kamenem elektromotoru a dynamu. První elektromotor zkonstruoval v roce 1828 Peter Barlow. Dále v letech 1834 až 1838 Moritz Hermann vylepšil motor na stejnosměrný proud tak, aby mohl být napájen z baterie. [2]

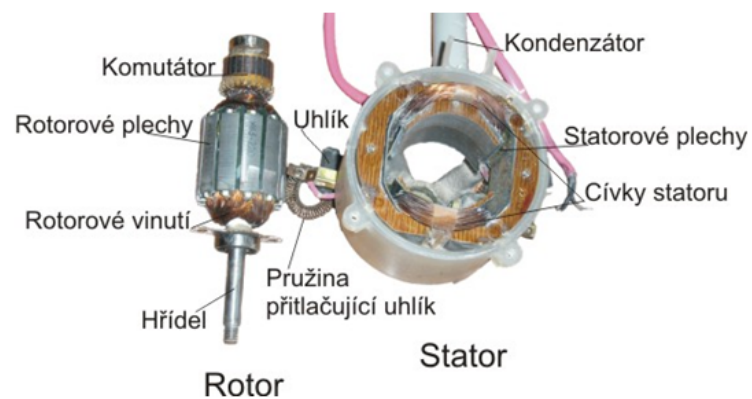
Obecně motory se začaly vyvíjet jako elektrické stroje. Technika v dnešní době je natolik vyspělá, že vyžaduje značnou přeměnu elektrické energie na energii mechanickou nebo naopak. Tato přeměna je vyžadována především v současném průmyslu v mnoha různých odvětvích. Elektrické stroje jako takové se začaly vyvíjet již před asi 170 lety a to na základě nově nabytých znalostí zákonů elektrotechniky. Tedy se začalo na vývoji strojů, které využívají nových zákonů elektrotechniky - principu elektromagnetické indukce a vzájemného působení elektromagnetických polí. [3]

Elektrické stroje jsou považovány ve strojírenství a elektrotechnice za nejdůležitější článek při výrobě. Přednostně proto, že jsou nedílným článkem elektrotechnických pohonů a automatizace. Elektrické stroje se budou v současné době nadále vyvíjet, jelikož je zde snaha například o zvyšování výkonnosti, miniaturizaci za předpokladu udržení výkonu. A to především díky vývoji nových materiálů, technologickém zpracování a podobně. [3]

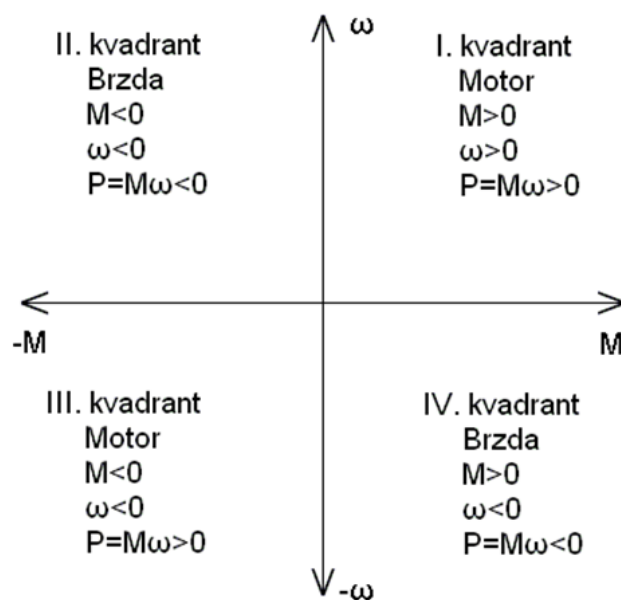
1.2 Motory obecně

Motory jsou točivé stroje pracující buďto jako generátory, což znamená, že přeměňují mechanickou energii na elektrickou (alternátory, dynamo, magneta). Nebo jako motory, které odebírají elektrickou energii a přeměňují ji na mechanickou, což je využíváno pro pohon strojů. Jejich účinnost se pohybuje někde mezi 75% až 90%. Zbytek jsou ztráty, které se přemění v teplo. [3] [7]

Samotný motor se skládá ze dvou základních částí **rotor** a **stator**. Jak již z názvu vyplývá tak rotor je rotující část motoru a nachází se vně statoru a stator je část motoru, která se nepohybuje. [3] [1]



Obr. 1.1: Konstrukce SS motoru. [11]



Obr. 1.2: Pohyb pracovního bodu v kvadrantech [5]

1.3 Pracovní režimy motorů

Motory mohou pracovat v následujících třech režimech. [1]

Režim motorický

V tomto režimu motor odebírá elektrickou energii ze sítě nebo z vhodného náhradního zdroje, baterie. Tuto energii poté přeměňuje na energii mechanickou.

Režim generátorický

V tomto režimu motor přeměňuje mechanickou energii stroje připojeného na hřídel a dodává ji do elektrické sítě, baterie, nebo elektrické zátěže (např.: alternátor v autě).

Režim brzda

V tomto režimu motor odebírá mechanickou energii z hřídele a přeměňuje ji na teplo.

1.4 Rozdělení elektromotorů

1.4.1 Podle druhu proudu

Základní rozdělení elektromotoru vyplývá z typu napájecího proudu. Tedy existují elektromotory stejnosměrné nebo střídavé. V případě stejnosměrných motorů je používán proud stejnosměrný a u motorů střídavých proud střídavý. [3] [1]

Stejnoseměrné motory

Stejnoseměrné motory se dále dělí do následujících typů:

- s permanentními magnety,
- s cizím buzením,
- se sériovým buzením,
- s paralelním buzením (derivační motor),
- se smíšeným buzením (kompaundní motor).

Stejnoseměrné motory lze také rozdělit dle zapojení vinutí statoru a rotoru na následující:

- zapojení sériové,

- zapojení derivační.

Střídavé motory

Podle vzájemného působení magnetických polí se motory střídavé rozdělují na synchronní, asynchronní.

Mezi synchronní motory patří:

- s vyniklými póly,
- s hladkým rotorem,
- s cizím buzením
- s permanentními magnety

Mezi asynchronní motory patří:

- nakrátko (klecové),
- kroužkové,
- s masivním rotorem (např.: Ferrarisuv motor).

Střídavé motory jsou také děleny na jednofázové a třífázové motory.

1.5 Základní parametry a pojmy

Tato kapitola popisuje základní pojmy. [1] [7]

Jmenovitý výkon (P) je číselná hodnota výkonu

Činný výkon (W) se u střídavých motorů udává ve wattech

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (1.1)$$

kde φ je fázový posuv mezi vektory proudu (I) a napětí (U) a $\cos \varphi$ je účinník.

Zdánlivý výkon (S) je uváděn u střídavých motorů ve voltampérech [VA].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} \quad (1.2)$$

kde P je hodnota činného výkonu a Q hodnota jalového výkonu.

Jalový výkon (Q) je udáván jako voltampér reaktanční [VAr].

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAr]} \quad (1.3)$$

kde φ je fázový posuv mezi vektory proudu a napětí.

Jmenovitý moment je točivý moment na konci hřídele motoru. V případě jmenovitého výkonu a jmenovitých otáček.

Maximální moment AM je největší hodnota točivého momentu, který motor vyvine na konci hřídele.

Záběrný moment AM je naměřený největší ustálený moment v případě zabrzděného rotoru.

Zatěžovatel je poměr doby od zatížení, kterou zahrnuje rozběh motoru, brzdění do doby trvání pracovního procesu. Zatěžovatel se udává v procentech.

Charakteristika momentová je závislost mezi momentem a otáčkami.

Brzdový motor je AM s vestavěnou mechanickou brzdou.

Převodový motor je motor, který je spojený s mechanickým převodem a tvoří tak jeden celek.

Momentový motor je elektromotor, který vytváří moment při omezeném pohybu nebo v nepohyblivém stavu.

Servomotor je motor, který je využíván při regulaci pohonu s řízením polohy, rychlosti. Rotor vykonává předem danou dráhu s vysokou dynamikou.

Reakční motor je synchronní motor, který má nebuzený rotor.

1.6 Stejnosměrný motor

Stejnosměrný motor je točivý stroj, který ke svému pohonu využívá stejnosměrného napětí. Takovéto napětí nemění v čase svou polaritu, ale velikost změnit může. Všechny stejnosměrné motory (stroje) mohou pracovat jako generátory nebo jako motory. Jestliže prochází proud vinutím motoru od jeho začátku k jeho konci, tak se v takovém případě kotva otáčí ve směru doprava. V případě provozu stejnosměrného motoru jako generátoru, zůstává směr proudu ve vinutí stejný, za předpokladu, že se kotva motoru otáčí vlevo. Konstrukce stejnosměrných motorů umožňuje regulovat ve velkém rozsahu plynule otáčky a to nezávisle na zátěži. A právě proto jsou tolik využívány například u obráběcích strojů, dopravníků a dopravních prostředků, kterými jsou například vlaky. [1]

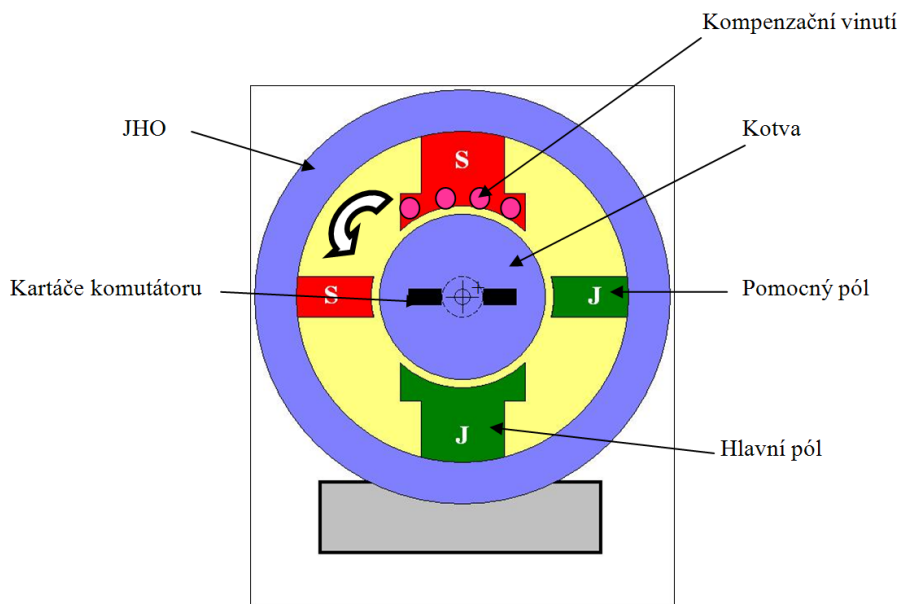
1.6.1 Konstrukce stejnosměrného motoru

Stator je část motoru, která se skládá z ocelového jha a hlavních pólů, které jsou tvořeny elektrotechnickými plechy, na nichž je umístěno budicí vinutí (Obr.1.3). Motory s vyšším výkonem mají navíc pomocné póly a také kompenzační vynutí. Stejnosměrné motory mají pro provoz s usměrňovači kostru tvořenou elektrotechnickými plechy, v jejichž drážkách je uloženo vinutí statoru. [1]

Rotor jinak řečeno kotva je rotující část motoru. Skládá se ze svazku elektrotechnických plechů s drážkami, ve kterých je umístěno vinutí. Počátky a konce vinutí rotoru jsou zapájeny do lamel komutátoru motoru. [1]

1.6.2 Princip činnosti

Točivý moment vychází ze síly způsobené proudem, který prochází vinutím rotoru, umístěném v magnetickém poli hlavních pólů. Při otáčivém pohybu rotoru v magnetickém poli se v cívkách rotoru indukuje napětí. Toto napětí působí proti připojenému napětí ze sítě a tím pádem omezuje proud rotoru. Je-li rotor v klidu, pak bude jeho napětí nulové. Při provozu stejnosměrného motoru jsou otáčky a napětí rotoru závislé na zátěži. To znamená, že při narůstajícím zatížení se zvyšuje proud, při stálém síťovém napětí. Aby se snížilo napětí rotoru, je nutné snížit otáčky motoru. [1]



Obr. 1.3: Princip činnosti stejnosměrného motoru. [1]

Mezi hlavními póly se přivádí proud ke kotvě pomocí kartáče a komutátoru. Pak proud ve vinutí rotoru vytváří magnetické pole, které je příčné k hlavnímu pólu a

je označováno jako příčné pole rotoru. Příčné pole rotoru ovlivňuje hlavní magnetické pole. Poloha neutrálního pásma mezi hlavními póly se tím posune bez ohledu na to, jak velkou zátěží je na motor působeno. Tak dochází k poškození kartáčů a komutátoru jiskřením, opalem. Aby se zamezilo poškození kartáčů a komutátoru mají motory do 1kW pomocné póly, které jsou vidět na Obr.1.3. [1]

Pomocné póly

Pomocné póly jsou umístěny mezi hlavními póly. U pomocných pólů je vinutí tvořeno několika závitů vodiče o větším průřezu, které je pak zapojeno do série s vinutím rotoru. Magnetické pole těchto pólů pak působí svými účinky proti příčnému poli rotoru a nedochází tak k tomu, že by se začalo natáčet neutrální pásmo. [1]

Kompenzační vinutí

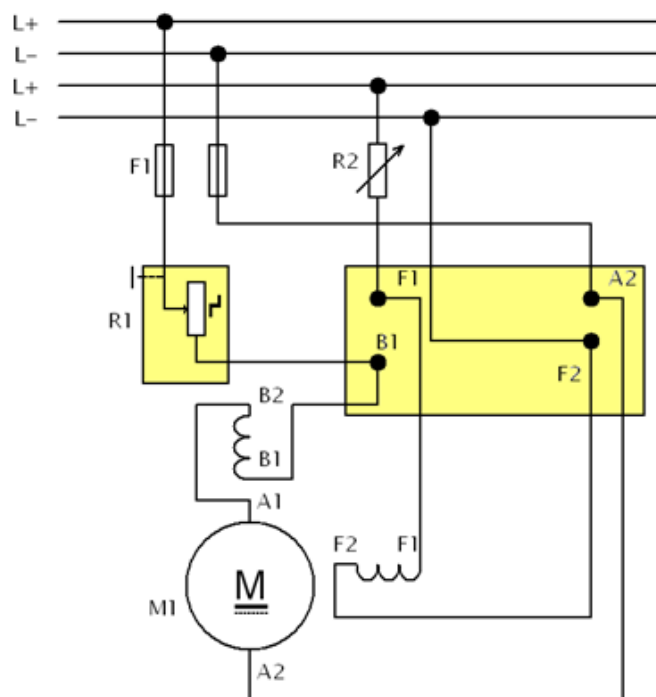
Kompenzační vinutí zapojeno být může a nemusí. V případě že bude nutné jej zapojit, je možno ho připojit dodatečně. Připojuje se k vinutí pomocných pólů tehdy, kdy zátěž stejnosměrného motoru hodně kolísá při vysokých otáčkách motoru. Toto vinutí se umísťuje do drážek v pólových nastavcích hlavních pólů (Obr.1.3). Zapojuje se do série s vinutím pomocných pólů a vinutím rotoru. [1]

1.6.3 Vybrané typy stejnosměrných motorů

Motory s cizím buzením

U tohoto typu motoru má budící vinutí L1-L2 zajištěno napájení z vlastního zdroje napětí jak lze vidět na Obr.1.4. Z toho vyplývá, že proud budícího vinutí není závislý na proudu rotoru. Cizího buzení využívají také motory s permanentními magnety. Otáčky pak klesají při zatížení minimálně. [1]

Proud, který budí motor vzhledem k proudu rotoru je malý. Budící vinutí má malý průřez a mnoho závitů. Bude-li rezistor R1 dimenzován tak, že jej bude možno využít pro trvalý provoz, pak je možno regulovat otáčky od nuly. Z toho plyne, že rezistor R1 má maximální hodnotu. V případě jmenovitých otáček má rezistor R1 hodnotu nula, tedy je odpojen. Kdyby však mělo být dosaženo vyšších otáček, než jsou otáčky jmenovité, lze toho dosáhnout a to tak, že bude v obvodu zapojen budící reostat R2, to znamená budícím reostatem R2, zmenšením budícího proudu tedy odbuzením při jmenovitém napětí na rotoru. Regulaci otáček motoru s cizím buzením lze provést napětím na rotoru nebo budícím proudem. Vzhledem k tomu, že rezistory při regulaci otáček způsobují ztráty, je většinou obvod rotoru i obvod buzení napájen z trojfázové sítě přes řízené usměrňovače. Tyto motory se všeobecně nejvíce v praxi uplatňují například u obráběcích strojů. [1]



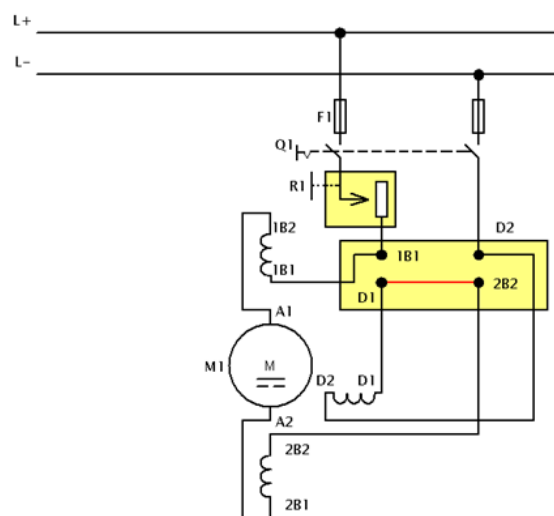
Obr. 1.4: Schéma obvodu motoru s cizím buzením [1]

Motory s paralelním buzením (derivační motor)

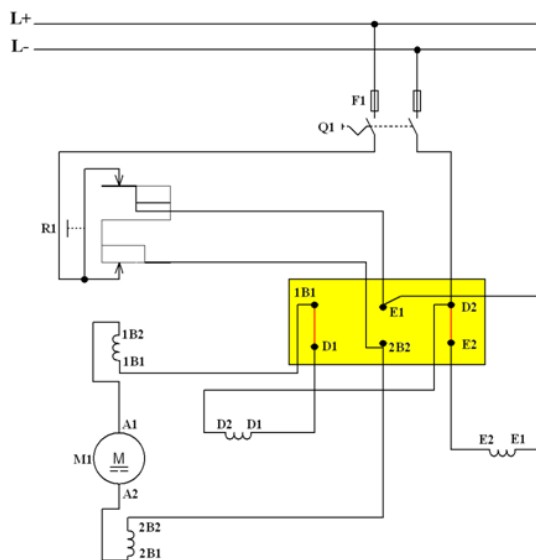
Derivační motory jsou konstrukčně řešeny stejně jako motory s cizím buzením, ale budící vinutí E1-E2 je připojeno paralelně k obvodu kotvy na jeden společný zdroj napětí. Dále je řešení tohoto motoru podobné jako u motoru s cizím buzením a to proto, že i regulace otáček se provádí stejně jako u těchto motorů. Při zatížení motoru větší zátěží klesají otáčky nepatrně. Ovšem jelikož se při regulaci otáček přes řízené usměrňovače projevuje negativně závislost buzení na obvodu rotoru, používají se místo derivačních motorů motory s cizím buzením. [1] [7]

Motory se sériovým buzením

U tohoto typu motoru je budící vinutí D1-D2 spojeno do série s vinutím rotoru (Obr.1.6). Velikost magnetického pole je dána velikostí proudu rotoru. Při pouštění a zatížení motoru vytvoří velký proud velké a silné magnetické pole rotoru a velmi silné budící hlavní magnetické pole. Tím pádem vznikne velký točivý moment. Tyto motory mezi ostatními typy mají největší záběrný moment. V případě, že se změní velikost zatížení, změní se také velikost budícího pole a tím pádem také otáčky. V případě chodu motoru naprázdno jsou otáčky motoru nebezpečně vysoké a to vlivem malého budícího pole. Motory se sériovým buzením mají otáčky velmi závislé na velikosti zatížení, rovněž při chodu naprázdno dosahují nebezpečně vysokých



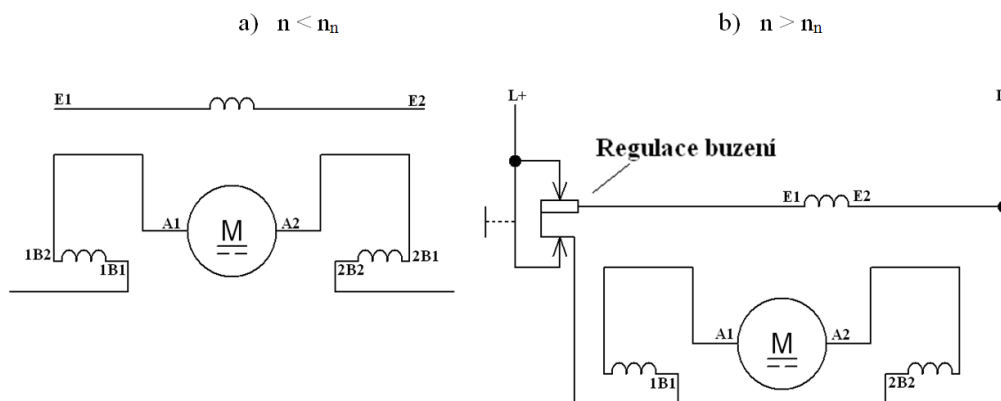
Obr. 1.6: Schéma obvodu motoru se sériovým buzením [1]



Obr. 1.7: Schéma obvodu kompaundního motoru [1]

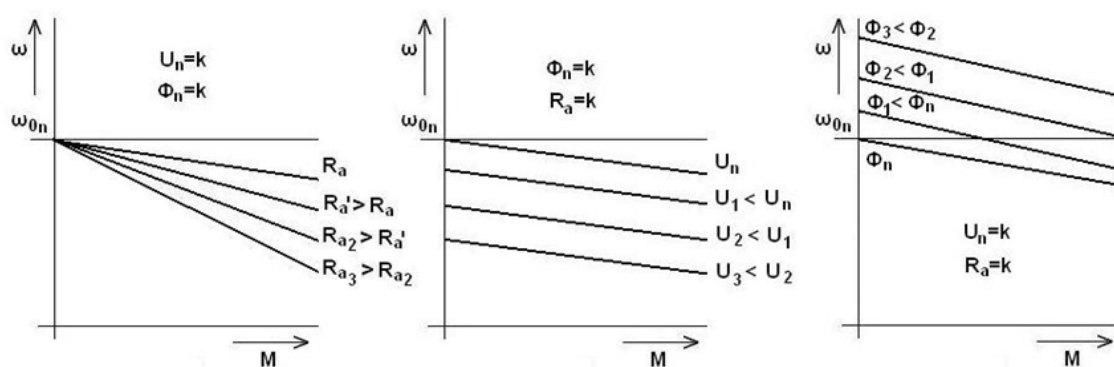
Regulace otáček stejnosměrných motorů

U stejnosměrných motorů se regulace otáček provádí v rozsahu pod jmenovitými otáčkami i nad nimi. V případě, že výrobce neudává jinak pak je možno přesáhnout jmenovité otáčky o 10%. Regulaci do jmenovitých otáček se provádí při jmenovitém buzení změnou napětí na rotoru. Regulaci otáček provádíme řízeným usměrňovačem, který dimenzujeme tak, aby mohl pracovat při trvalém provozu a zatížení (Obr.1.8). S rostoucím napětím na rotoru se otáčky zvyšují. Otáčky nad jmenovitou hodnotou se regulují napětím na rotoru zmenšováním budícího proudu. U derivačních motorů a u motorů s cizím buzením se do budícího obvodu zapojuje rezistor a tím se pole zeslabuje (Obr.1.8). v případě chodu naprázdno při přerušení buzení, přerušením vodiče v budícím reostatu, může motor dosahovat nebezpečně vysokých otáček. To znamená, že aby se zajistilo, že se buzení nepřeruší, nesmí se budící reostat stejnosměrného motoru s cizím buzením jistit. [1] [3]

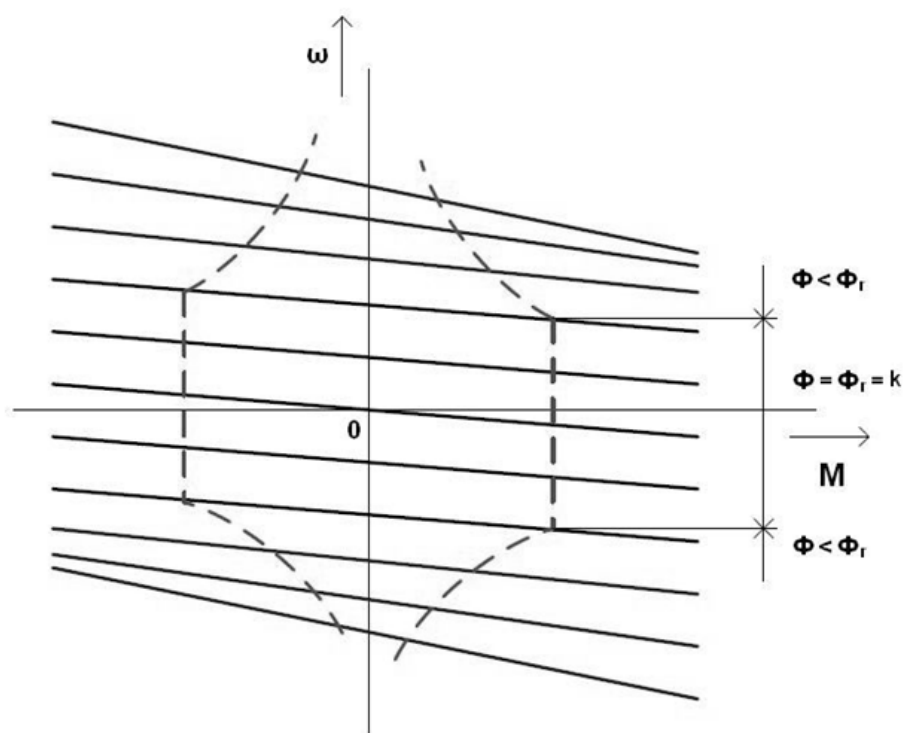


Obr. 1.8: Regulace otáček derivačního motoru. [1]

Změnu směru otáčení lze provést, změnou směr proudu v rotoru nebo v budícím vinutí. Aby nedošlo k poškození budícího vinutí vlivem indukovaného napětí, je změna směru otáčení rotoru u stejnosměrných motorů provedena otočením přívodů v obvodu rotoru nebo přepólováním. Tedy změnu směru otáčení provádíme změnou směru toku proudu v rotoru. Chod motoru vpravo je dán směrem proudu v rotoru a budícím vinutím od jeho začátku k jeho konci. Dále musí být pomocné póly i kompenzační vinutí přepojeny v případě změny otáčení rotoru. U motoru derivačního s pomocnými póly je běh vpravo při toku proudu od svorky 1B1 k 2B2 v obvodu rotoru od svorky E1 k E2 v budícím vinutí, běh vlevo je při směru proudu rotoru od svorky 2B2 k 1B1 a proudu v budícím vinutí beze změny od svorky E1 k E2. [3]



Obr. 1.9: Mechanické charakteristiky SS cize buzeného motoru [5]



Obr. 1.10: Mechanické charakteristiky SS cize buzeného motoru ve všech kvadrantech [5]

1.7 Asynchronní motor

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, který má magnetický obvod rozdělen malou mezerou na rotor a stator. Stator je pevná část asynchronního motoru a rotor je pohyblivá rotující část elektromotoru. Stator a rotor jsou tvořeny svazkem jednostranně izolovaných elektrolechů. Statorové vinutí je umístěno v drážkách statoru a naopak rotorové vinutí je uloženo v drážkách rotoru. Převážně je statorové vinutí připojeno na zdroj střídavého proudu a rotorové vinutí je spojeno na krátko a proud pak vzniká elektromagnetickou indukcí. Nejznámější a nejpoužívanější typ indukčního motoru je trojfázový indukční motor. Tento motor využívá silového působení statorového proudu a rotorového proudu, který se indukuje ve vinutí spojeném nakrátko. [3] [4]

Zakladními vlastnostmi trojfázového indukčního motoru je jeho vysoká spolehlivost, bezúdržbovost a jeho jednoduchost.

Velkou výhodou je, že se vyrábí v obrovském rozsahu výkonů, tj. od Wattu až do několika MW. Dále se vyrábí s velkým rozsahem otáček od několika desítek ot./min. až do několika set tisíc ot./min. Kdybychom chtěli porovnat asynchronní motor se stejnosměrným motorem, přišli bychom na to, že asynchronní motor vyniká jednoduchou konstrukcí a tím, že je téměř bezúdržbový. [7]

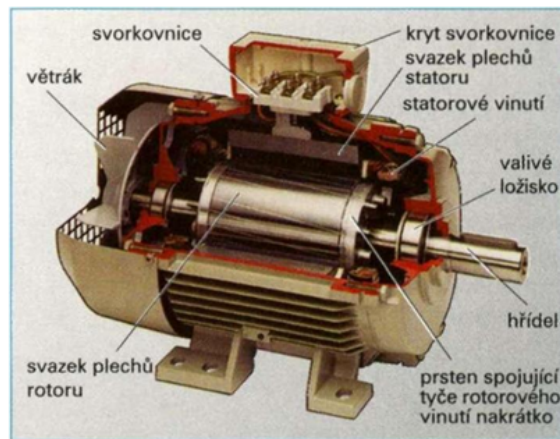
Indukční asynchronní motor rozdělujeme podle statorového vinutí na trojfázový a jednofázový. Indukční asynchronní motor rozdělujeme podle rotorového vinutí na nakrátko a kroužkový. [1]

1.7.1 Motor nakrátko

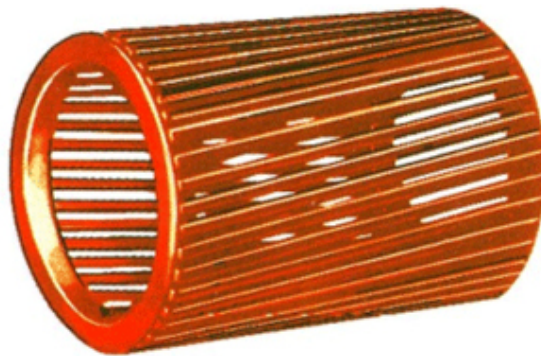
Motor nakrátko má rotorové vinutí spojeno trvale nakrátko. Vinutí je provedeno z tyčí, které jsou spojeny na obou stranách vodivými kruhy. Tyto tyče jsou zhotoveny z hliníku a vyrábějí se tlakovým litím. Parametry těchto tyčí pak ovlivňují rozběhovou charakteristiku motoru, tedy jejich velikost a tvar. Z tohoto důvodu se vyrábějí klecové rotory (Obr.1.12). Stator a rotor nejsou spojeny po elektrické stránce, nýbrž jsou spojeny magnetickým polem přes svazky rotorových a statorových plechů. [7]

Statorové vinutí je složeno buďto z dvoupólového, nebo více pólového vinutí. V drážkách statorového svazku plechů jsou uložena tři vinutí, jejichž začátky jsou proti sobě posunuty o 120° . Tato vinutí lze zapojit buďto do hvězdy, to v případě spojíme-li konce těchto vinutí (Obr.1.13a) anebo do trojúhelníka je-li spojen konec jednoho vinutí se začátkem následujícího vinutí (Obr.1.13b). [1]

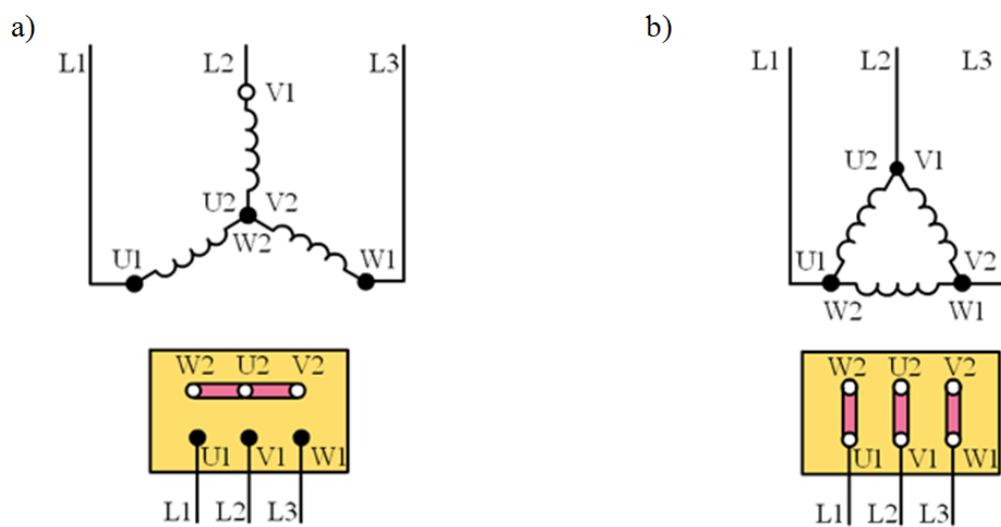
V případě připojení statorového vinutí k trojfázové síti, začne se vytvářet točivé elektromagnetické pole. Velikost otáček točivého elektromagnetického pole je



Obr. 1.11: Asynchronní motor s kotvou nakrátko v řezu [7]



Obr. 1.12: Klecová kotva

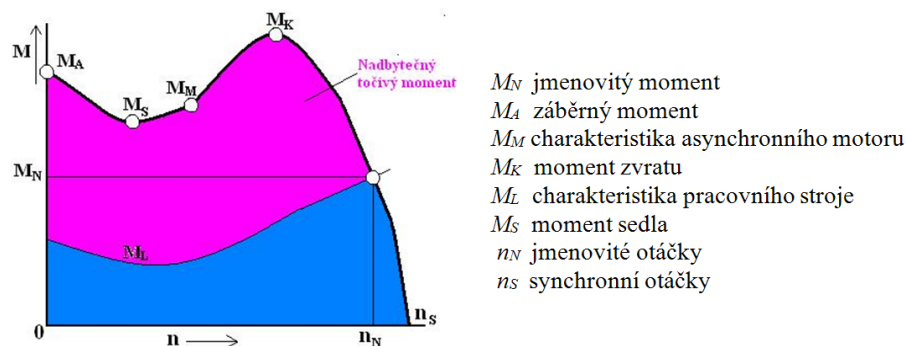


Obr. 1.13: Zapojení do hvězdy (a) a trojúhelníku (b) [1]

závislá na velikosti frekvence sítě. To znamená, že čím je vyšší frekvence, tím jsou vyšší otáčky. Při vzniku točivého momentu musí točivé pole indukcí vytvořit proud v rotoru. Z tohoto důvodu musí být otáčky rotoru stálé. A menší než synchronní otáčky točivého pole. Rozdíl v otáčkách se nazývá skluz. Tento tzv. skluz se pak uvádí v procentech %. Ve chvíli kdy je připojen motor s kotvou nakrátko, se tento motor chová jako transformátor, který má sekundární vinutí zapojeno nakrátko. Z tohoto důvodu má tento motor velmi velký odběr proudu a naopak velmi malý činný odpor. Motor pak představuje indukčnost. To způsobí zpoždění rotorového proudu téměř o 90° za napětím rotoru. Ze znalosti indukčního zákona je známo, že velký fázově posunutý rotorový proud působí velký fázově posunutý statorový proud. Činný výkon je i přes velký statorový proud velmi malý. [1]

Rotor s hlubokými drážkami

V případě vysokých otáček působí rotor s hlubokými drážkami větší činný odpor, což má za následek zmenšení odběru proudu a zlepšení účinníku. Motory s tímto typem rotoru nebo dvojitou klecí mají menší záběrný proud při současně větším záběrném momentu M_A . Točivý moment: motoru ovlivňují například provozní podmínky a mechanické provedení rotoru. Průběh točivého momentu je vyobrazen na Obr.1.14. [1]



Obr. 1.14: Průběh točivého momentu [1]

Hlavními body momentové charakteristiky jsou

- záběrný moment
- jmenovitý moment
- moment sedla
- moment zvratu

Točivý moment musí být v celém svém průběhu větší, než je příslušný zatěžovací moment stroje. Přesah točivého momentu je vyznačen fialově na obr.1.14. [1]

Záběrný moment

Tento typ momentu je označován M_A . Jde o točivý moment, který vyprodukuje motor v případě připojení k síti. U motorů, které mají rotor s hlubokými drážkami nebo s dvojitou klecí dosahuje přibližně dvojnásobku až trojnásobku jmenovitého momentu M_N . [1] [5]

Jmenovitý moment

Tento moment se označuje M_N . Jedná se o moment, který působí na hřídeli rotoru při jmenovitém výkonu. V případě zatížení jmenovitým momentem má motor jmenovité otáčky. [5]

Moment sedla

Moment sedla M_S je nejmenší typ momentu po připojení motoru k síti a jeho rozběhu. Moment sedla lze omezit a to tak, že je provedena konstrukční úprava, která spočívá například v šikmém uspořádání rotorových drážek. [5]

Moment zvratu

Tento moment A_{fK} je naopak největší moment rotoru. Takovýto moment vzniká po dosažení momentu sedla M_S . V případě trojfázových normovaných motorů dosahuje moment zvratu přibližně 2,5 – 3 násobku jmenovitého momentu.

Důležité je poznamenat že, otáčky rotoru při rostoucím zatížení klesají. Naopak skluz asynchronního motoru s narůstajícím zatížením roste. Skluz se mění někde mezi chodem naprázdno a jmenovitým momentem. [5]

1.7.2 Motor s kroužkovou kotvou

Motory s kotvou nakrátko nebo motory s kroužkovou kotvou mají stejná satorová vinutí. [4]

Rotorové vinutí motoru s kroužkovou vazbou je ve většině aplikací trojfázové a konce tohoto vynutí jsou zapojeny do hvězdy. Pak začátky budou připojeny na tři sběrací kroužky. Spouštěč je zapojen na sběrnici kroužky pomocí „uhlíkových přitlačných kartáčů“. Do obvodu cívek rotoru je možné zapojit tzv. spouštěcí rezistory. Tyto rezistory mají za úkol zvětšit činný odpor obvodu rotoru. Zmenšený proud rotoru způsobí menší proud statoru. Velikost záběrného proudu je přibližně 1,4 – 1,6 krát větší než je jmenovitá hodnota proudu. Motory s kroužkovou kotvou jsou vhodné pro těžké rozběhy. [7]

I když se při rozběhu proud zmenší, je záběrný moment větší. V případě zvyšování otáček se úměrně spouštěcí odpor zmenšuje. Ve chvíli kdy je dosaženo jmenovitých otáček, se spouštěcí odpor zkratuje. Pak rotor pracuje s kotvou na krátko. Jestliže se během provozu zvětší odpor rotoru, pak se zvětší i skluz a tím se zmenší otáčky rotoru. Již zmiňované spouštěcí rezistory se dimenzují tak, aby při trvalém zapojení v provozu byly schopny nastavit a regulovat tzv. jemné otáčky rotoru, které jsou menší, než jsou otáčky jmenovité. Aby bylo možné regulovat otáčky, je požadován provoz se stálým zatížením. Kdyby se velikost zatížení změnila směrem dolů, menší zatížení by způsobilo zvýšení otáček.

Motory s kroužkovou vazbou jsou využívány i pro dálkové ovládání. Tyto motory mají velkou nevýhodu v ceně. Jsou totiž příliš drahé a mají v provozu nepříliš vhodný účinník, například v porovnání motoru s kotvou nakrátko.

Tento typ motoru se využívá k pohánění strojů, které pracují pod plným zatížením a potřebují pro svůj provoz velký záběrný moment, například pohon halových jeřábů, také se využívají pro pohony, které potřebují regulovat otáčky pod jmenovité otáčky.

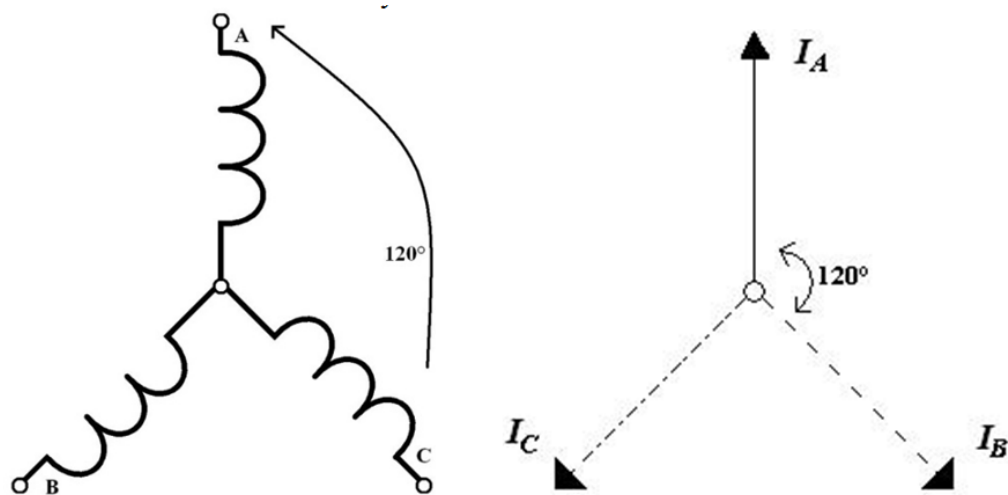
1.7.3 Princip činnosti asynchronních motorů

Zakládá se na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů, které jsou vytvořeny ve vinutí rotoru tímto magnetickým polem. Asynchronní motor také nazýváme indukčním motorem, protože je založen na indukci napětí a proudu v rotoru. [5]

Vznik točivého magnetického pole

Toto pole vzniká tak, že tažná síla asynchronního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole, které je rovno dvěma nebo více polím, tato pole jsou vzájemně prostorově i časově posunuta, a magnetického pole rotoru. Z toho plyne, že točivé magnetické pole vzniká z tažné síly asynchronního motoru a magnetického pole rotoru. Takovéto točivé magnetické pole je možno vytvořit více způsoby. Například se třemi stejnými válcovými cívkami, pootočenými navzájem o 120° , jestliže jsou napájeny trojfázovým proudem (Obr.1.15). Výsledkem je, že magnetické pole, které je buzeno třemi cívkami pootočenými o 120° , napájenými trojfázovým proudem, se nikdy v čase nemění. Fázor magnetického pole se otáčí ve směru fází, se stejným úhlovým kmitočtem ω s. Tento úhlový kmitočet pak závisí na kmitočtu napájecího proudu. Tzv. koncový bod fázoru výsledného magnetického toku opisuje kružnici a právě odtud je nazýváno jako točivé kruhové magnetické pole. Otáčkám točivého magnetického pole se říká synchronní otáčky. Synchronní otáčky proto, neboť závisejí na kmitočtu napájecího proudu. U tohoto pole je možné změnit směr

otáčení a tím i směr otáčení asynchronního motoru. Toho lze docílit přepojením libovolných dvou fází mezi sebou. V případě napájení z polovodičového měniče potažmo střídače se dosáhne změny otáček řízením. [5] [1]



Obr. 1.15: Schématické uspořádání tří válcových cívek (a), Fázorový diagram napájecího proudu (b) [1]

Vznik tažné síly

Spojí-li se jeden závit nakrátko a je vložen do točivého magnetického pole, vznikne tím nejjednodušší druh rotoru indukčního motoru. Po dobu otáčení točivého magnetického pole se velikost magnetického toku závitu mění. Touto změnou se stane, že se začne indukovat napětí v závitě, které potlačuje velikost proudu. Takovýto proud pak vybudí magnetické pole, které ve spolupráci s točivým polem statoru vytváří potřebný točivý moment. Indukční motor se takto sám roztočí, což je jeho velkou výhodou. [3]

Uvažujeme-li indukční motor, který nemá žádné mechanické ztráty, pak se jeho rotor roztočí při rozběhu na synchronní otáčky a bude se otáčet stejně, jako se otáčí otáčivé magnetické pole. Vodiče indukčního motoru neprotínají indukční čáry a také se v nich neindukuje žádný proud. Točivý moment by byl roven nule a rotor indukčního motoru by se otáčel nadále, ale pouze svou setrvačností. V případě, že rotor mechanicky zatížíme, rotor se zpomalí. To znamená, že indukční čáry protínají vodiče. V těchto vodičích se indukuje proud, díky kterému vzniká tažná síla. Z všeobecné znalosti elektrického motoru vyplývá, že při větším zatížení rotoru se automaticky zvyšuje hodnota rotorového proudu a tím se i pomaleji rotor otáčí. [3]

Když zatížení roste, otáčky indukčního motoru klesají. Skluz je poměrný pokles otáček rotoru n vzhledem k otáčkám otáčivého magnetického pole n_0 . Skluz se udává

v procentech. [5]

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100 [\%] \quad (1.4)$$

kde

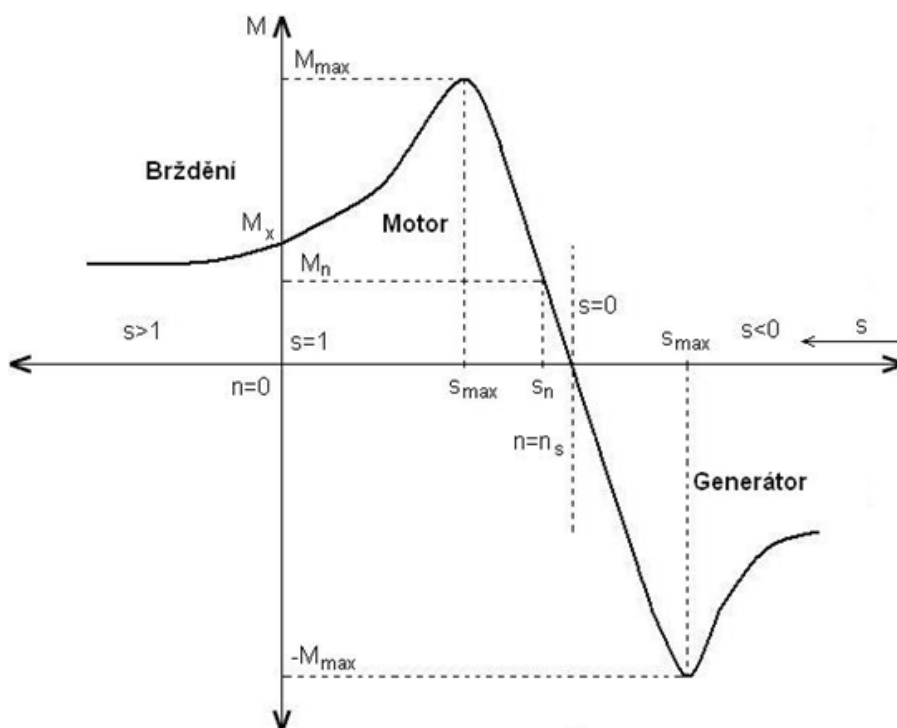
s je sluz,

n jsou otáčky rotoru,

n_0 jsou otáčky točivého magnetického pole.

Hodnota skluzu bývá převážně někde mezi hodnotami 1% – 10%, tato hodnota se udává podle odporu rotorového vinutí. Průměrnou hodnotou je asi 5%. Ze zkušeností z praxe víme, že malé motory mají velikost skluzu větší, než ji mají motory velké. [5]

1.7.4 Mechanická charakteristika asynchronního motoru



Obr. 1.16: Mechanická charakteristika asynchronního motoru [5]

Tato mechanická charakteristika respektive momentová charakteristika asynchronního motoru představuje motor s kotvou nakrátko. Když se podíváme na oblast motorickou, vidíme, že s je v rozsahu 0 až 1, a to odpovídá rozsahu otáček $n = (n_0$

až 0). Dále vyznačujeme jmenovitý moment M_n , který musí tedy odpovídat daným jmenovitým otáčkám motoru, a také vyznačujeme moment maximální, který je v odborné literatuře nazýván momentem zvratu M_{max} . [5]

Tuto charakteristiku je možné vypočítat a to za pomoci tzv. zjednodušeného Klosova vztahu. Tento vztah má pak podobu: [5]

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (1.5)$$

kde skluz vychází ze vztahu

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.6)$$

otáčky naprázdno

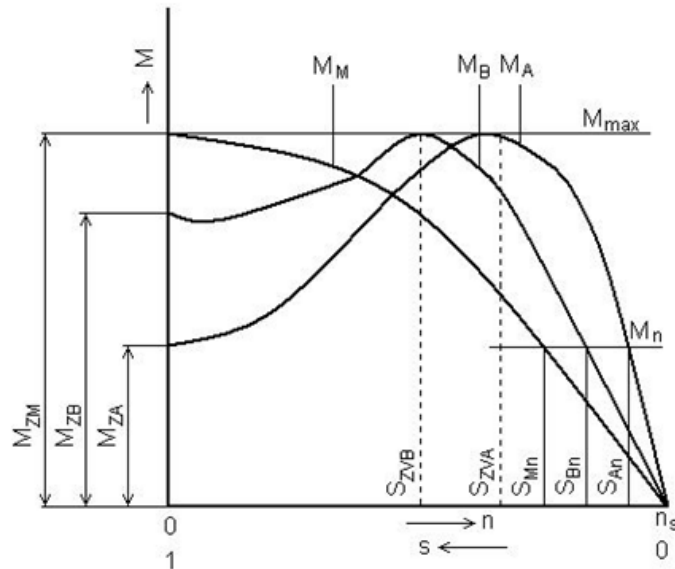
$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1.7)$$

kde

f_1 je napájecí kmitočet,

p je počet polpárů.

V případě využívání motorů kroužkových, je možné zařazením vnějšího odporníku zvětšovat skluz zvratu a tím pádem posouvat mechanickou charakteristiku, jak je patrné na Obr.1.17. [5]



Obr. 1.17: Momentové charakteristiky pro různé odpory rotoru [5]

Napájecí kmitočet f_1 , se kterým se počítá při výpočtech synchronních otáček tedy otáček naprázdno, mění synchronní rychlost. Tento způsob změny synchronních otáček je v současné době nejideálnější a to především, protože má nejmenší ztráty. V minulosti tomu však bylo jinak, a to především z toho důvodu, že nebyly ještě dostupné odpovídající měniče kmitočtu. Tyto měniče se postupem času zdokonalovaly a to především díky rozvoji výkonové a řídicí elektrotechniky. V současnosti však už toto neplatí, jelikož jsou dostupné tyto měniče a to i z hlediska jejich ceny. Pokud bychom chtěli hovořit o dalších možnostech regulace otáček u asynchronních motorů s kotvou nakrátko, které se v dnešní době používají, pak se nedají srovnávat a to především z toho hlediska, že v případě regulace otáček motoru, která je prováděna pouze velikostí napájecího napětí, není dosti účinná. To především proto, že tato regulace je proveditelná pouze v úzkém rozsahu otáček. V případě kroužkových motorů je tomu jinak a to díky tomu, že je možné změnit sklon neboli tvrdost mechanické charakteristiky a to tak, že se zařadí vnější rotorový odporník. Bohužel tato situace také moc nevyhovuje, jelikož opět dochází k velkým ztrátám. [5] [1]

1.7.5 Regulace otáček asynchronního motoru

Závislost otáček asynchronního motoru je dána otáčkami točivého pole. Otáčky regulujeme změnou počtu pólů, změnou frekvence nebo u asynchronních motorů skluzem. [1]

Změna počtu pólů

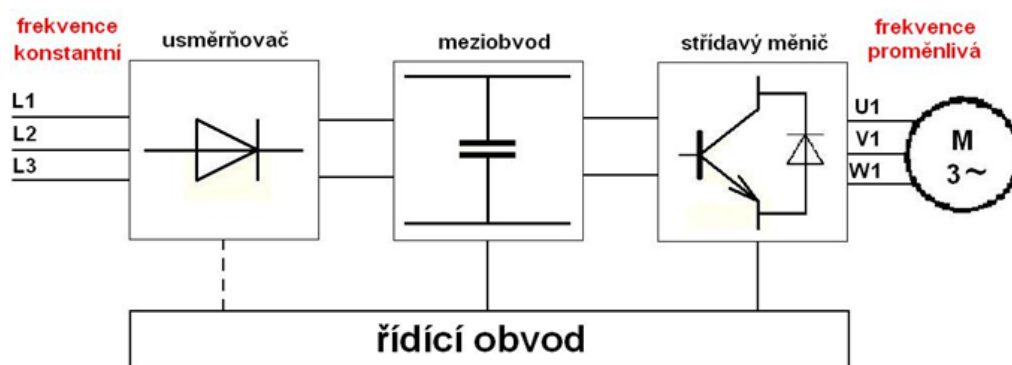
Změnou počtu pólů máme namysli, že stator může být složen ze dvou oddělených vinutí, která mají různé počty pólů. V případě změny otáček motoru metodou přepojení pólů nejsme schopni zajistit plynulou změnu otáček. Příkladem může být přepojení čtyř pólů na osm. V tomto případě se otáčky motoru sníží z 1500 ot./min na 750 ot./min. Pak motor na krátkou dobu pracuje v režimu generátorickém a nastává velké mechanické a elektrické namáhání motoru. [1]

Regulace skluzem

Tento typ regulace se vyskytuje u motorů s kroužkovou kotvou, kdy jsou otáčky motoru měněny zapojením rezistorů do obvodu rotoru. Pak elektrický výkon, který spotřebují rezistory zvětší skluz, čímž se sníží otáčky motoru. Tento typ regulace otáček má nevýhodu ve vysokých tepelných ztrátách. Dále je tato regulace možná pouze u otáček, které jsou nižší než otáčky točivého pole. Nastavené otáčky jsou závislé na velikosti zatížení. Pakliže je zatížení motoru sníženo, otáčky se zvýší. [1]

Regulace změnou frekvence

Se změnou frekvence se mění i otáčky točivého pole. Měníče frekvence jsou schopny přeměnit síťové napětí při frekvenci 50Hz na síť s jinou frekvencí a jiným napětím. Měníč frekvence se pak skládá z usměrňovače, meziobvodu a střídavého měniče. Tento typ regulace otáček je výhodnější než-li tomu bylo u regulace skluzem a to především díky regulaci otáček nižších i vyšších než otáčky točivého pole. [1]



Obr. 1.18: Frekvenční měnič s meziobvodem [1]

Rozdělení bloku měniče [1]

- Usměrňovač je připojen k jednofázové nebo trojfázové síti a vyrábí stejnosměrné napětí. Tento můstkový usměrňovač je zapojen jako řízený nebo neřízený.
- Meziobvod slouží k oddělení sítě od výstupu z měniče. A pracuje jako zásobník energie. Tento kondenzátor je vhodný v případě, kdy je požadována, aby napětí meziobvodu bylo konstantní. Proto se kondenzátor napájí ze sítě.
- Střídavý měnič přeměňuje stejnosměrné napětí z meziobvodu na trojfázové střídavé napětí s měnitelnou frekvencí a napětím. Efektivní hodnota napájecího napětí se mění delším nebo kratším zapnutím konstantního napětí meziobvodu.
- Řídící obvod se skládá z řídicí a regulační části obvodu a také z elektronických obvodů, které mají za úkol řídit a ovládat polovodičové součástky.

1.7.6 Brzdění asynchronního motoru

Stejnoseměrné brzdění

V případě tohoto typu brzdění je nutné odpojit stator od střídavé složky a připojit jej k složce stejnosměrného napětí. Jestliže se bude motor chovat jako střídavý generátor, pak se jedná o dynamické brzdění. Při takovémto brzdění dochází ke ztrátám. Tyto ztráty jsou v podobě energie, která se přeměňuje na teplo v odporech rotoru. Tento způsob brzdění je velice neefektivní a to z hlediska malého brzdného momentu, který je způsoben malou poměrnou rychlostí vzhledem k velké rychlosti otáčení motoru. V takovémto případě se do rotoru přidává tzv. přídavný odpor R_p . [7]

Protiproude brzdění

Toto brzdění je velice jednoduché. Jde pouze o otočení fází napájecího napětí. V takovémto případě pak dojde ke změně otáčení točivého pole. Z toho plyne, že se rotor začne pohybovat proti poli. Napětí, které se indukuje spolu s frekvencí, vzroste v tomto okamžiku na dvojnásobek. To je důvod proč u kroužkového motoru je zapotřebí přiřadit ke každé fázi rotoru odpor, který má dvojnásobnou hodnotu, než-li měl předtím. [7]

Generátorické brzdění

Zvýší-li se rychlost AM nad hranici ω_0 , pak se motor dostane do oblasti generátorického brzdění. Dalším způsobem jak dosáhnout tohoto typu brzdění je naopak snížit rychlost. Snížené rychlosti lze dosáhnout snížením frekvence napájecího zdroje. Tohoto typu brzdění se využívá téměř u všech měničů kmitočtu. [7]

1.8 Synchronní motor

Konstrukce statoru je stejná jak u synchronního tak i u asynchronního motoru. Rozdílem je však to, že synchronní motor má vyčnívající magnetické póly. Takovýto rotor je tvořen několika pólovými páry a může být také použit u nízkootáčkových motorů. Tyto soustavy pólů jsou buzeny stejnosměrným proudem. V případě menších motorů je využíváno permanentních magnetů. Klasický synchronní motor se samovolně neroztočí po připojení k střídavé síti. Hlavní příčinou je setrvačnost rotoru a jeho vysoká rychlost točivého magnetického pole. Rotor musí dostat nějaký vnější impuls, aby dosáhl stejných otáček, jaké má točivé pole. Je-li přiveden do vinutí statoru trojfázový proud, automaticky vyniká požadované magnetické pole,

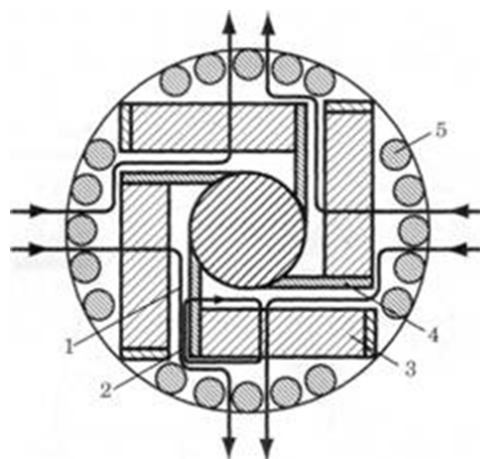
které je poté schopno roztočit buzený motor. Toto je působení synchronních motorů, které se po roztočení točí současně s točivým magnetickým polem a to shodně se synchronními otáčkami, odtud tedy pojem *synchronní motor*. Tyto synchronní otáčky se nemění a to ani po zatížení motoru. [7]

1.8.1 Základní rozdělení synchronních motorů

- podle typu budicího obvodu,
- podle uspořádání vinutí na rotoru.

Podle typu budicího obvodu [3]:

- s permanentními magnety,
- reluktanční,
- budícím vinutím na rotoru.



- 1) Účinný magnetický tok
- 2) Uzavřený magnetický tok
- 3) Permanentní magnety
- 4) Distanční deska (nemagnetická)
- 5) Startovací klec

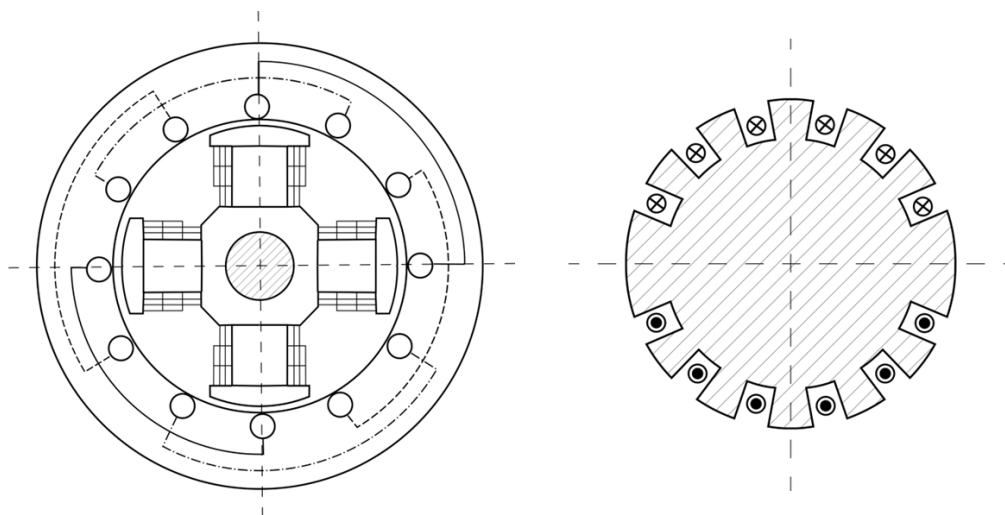
Obr. 1.19: Synchronní motor s permanentními magnety [12]

Podle uspořádání vinutí na rotoru [5]:

- S vyjádřenými póly (Obr.1.20a): takovýto rotor se skládá z kola, na kterém je určitý počet pólů. Každý tento pól má svou budicí cívku.
- S hladkým rotorem (Obr.1.20b): takovýto rotor tvoří válec, tento válec má na svém povrchu drážky, které jsou vedeny podélně po povrchu. V těchto drážkách je uloženo budicí vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem.

Na obr.1.20a jsou znázorněny čtyři póly. Budicí vinutí jsou napájena stejnosměrným proudem a to buďto z budiče anebo z polovodičového měniče. Budicí obvod budí neustále střídavě severní a jižní pól. Trojfázové vinutí je uloženo ve statorových drážkách. [5]

Existují dva základní typy uložení permanentních magnetů:



Obr. 1.20: S vyjádřenými póly (a), s hladkým rotorem (b) [5]

- na povrchu rotoru,
- uvnitř rotoru.

1.8.2 Uložení permanentních magnetů na povrchu rotoru

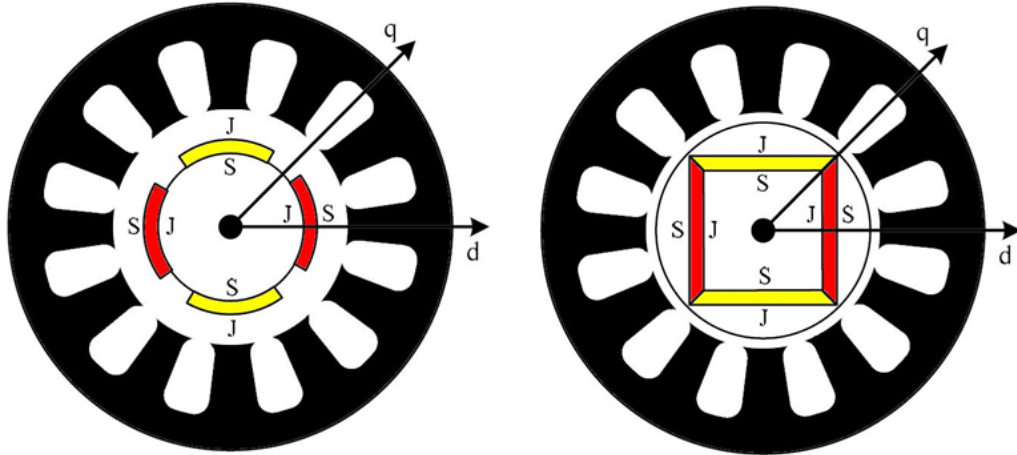
Stator má za předpokladu ideálních podmínek třífázové sinusově rozložené vinutí. Toto vinutí vytváří otáčivé magnetické pole ve vzduchové mezeře. Permanentní magnety se nacházejí na povrchu rotoru a generují magnetické toky ve vzduchových mezerách. Rotor je tvořen železným jádrem, toto jádro může být například tvořeno jedním celistvým kusem nebo je tvořeno jednotlivými plechy. V případě otáčení rotoru motor generuje třífázové sinusové napětí. Vzhledem k tomu, že permeabilita permanentních magnetů se blíží k jedné, je vzduchová mezera velká a takovýto motor se poté chová jako stroj s nevyjádřenými póly. V současné době však už existují konstrukce, kde mají permanentní magnety z části zapuštěné do rotoru a tím jsou zlepšeny mechanické vlastnosti motoru. [5] [3]

1.8.3 Uložení permanentních magnetů uvnitř rotoru

Tento motor má na rozdíl od toho předchozího uložení permanentních magnetů uvnitř rotoru (Obr.1.21b). V případě vnitřního uložení máme řadu možností, jak do rotoru uložit permanentní magnety. Takovéto motory pak mají ve většině případů sinusově rozložené třífázové vinutí a to na statorové straně.

Zvolený způsob uložení permanentních magnetů, ovlivňuje některé vlastnosti motoru: [5] [3]

- Motor má silnější konstrukci a díky tomu je možné dosahovat podstatně vyšších otáček.
- Vzduchové mezery jsou menší.
- Zvětšená reakce kotvy (závislost na velikosti vzduchové mezery).



Obr. 1.21: Rozložené permanentní magnety na povrchu rotoru - vlevo (a), Rozložené permanentní magnety uvnitř rotoru - vpravo (b) [5]

Moment synchronního motoru je tvořen následujícími složkami: [5]

- Složka synchronní: 1. Člen rovnice – buzení rotoru
- Složka reakční: 2. Člen rovnice – změna magnetické vodivosti v q, d , kde q je příčný směr rotoru a d je podélný směr rotoru.

Reakční složka vzniká i v případě nebuzeného rotoru, tedy vzniká i u motoru s vyniklými póly. Reakční složku je také využívána u speciálních typů motorů, které nemají budicí obvod, nejsou tedy buzeny a to ani permanentními magnety. Takovýto druh rotoru je složen ze zubů, které jsou vyrobeny z magnetického materiálu. Takovéto motory jsou nazývány reluktančními. Na stejné bázi pracují i krokové motory. [5]

$$M = \frac{3}{\omega_s} \cdot p \left[\frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \cdot \sin\theta_L + \frac{U^2}{2X_d X_q} \cdot (X_d - X_q) \cdot \sin 2\theta_L \right] \quad (1.8)$$

kde

efektivní hodnota napájecího napětí je dána

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ [V]} \quad (1.9)$$

efektivní hodnota indukovaného napětí je dána

$$U_{if} = \omega_s \psi_{fef} \quad (1.10)$$

p značí počet polpárů
reaktance v podélném směru je dána

$$X_d = \omega_s L_d \quad (1.11)$$

reaktance v příčném směru je dána

$$X_q = \omega_s L_q \quad (1.12)$$

a úhlová elektrická rychlost je dána

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (1.13)$$

Momentová rovnice synchronního motoru říká, že v případě zvětšení zatížení motoru v pracovní části charakteristiky se současně zvětšuje úhel θ_L . [3]

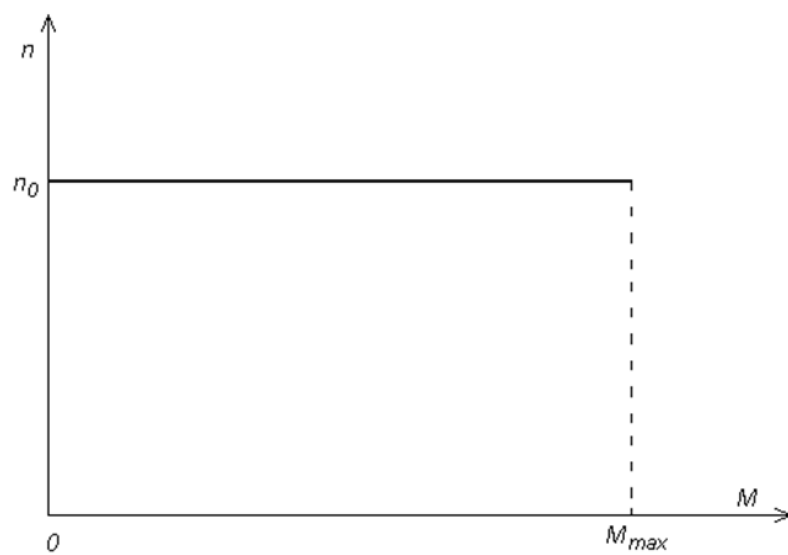
1.8.4 Mechanická charakteristika synchronního motoru

Vztah pro synchronní otáčky, které nezávisí na zatěžovacím momentu je: [5]

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1.14)$$

Ze vztahu pro synchronní otáčky vyplývá řízení synchronního motoru jeho napájecím kmitočtem f_1 . Aby bylo možné řídit otáčky synchronního motoru, musí být k dispozici měnič, který napájí příslušný synchronní motor vybaven regulačními řídicími obvody a to z toho důvodu, že synchronní motor není schopen na rozdíl od asynchronního motoru samotného rozběhu po připojení ke zdroji napětí. [3]

Při pohledu na mechanickou charakteristiku je patrné, že během zatížení se otáčky synchronního motoru nemění. Co se ale mění, je zatěžovací úhel θ_L mezi rotorem a statorem a to tak, že se zvětšuje. Při překročení tohoto úhlu přes jeho mez dojde k zastavení motoru. V tomto případě se jedná o poruchu motoru. [3]

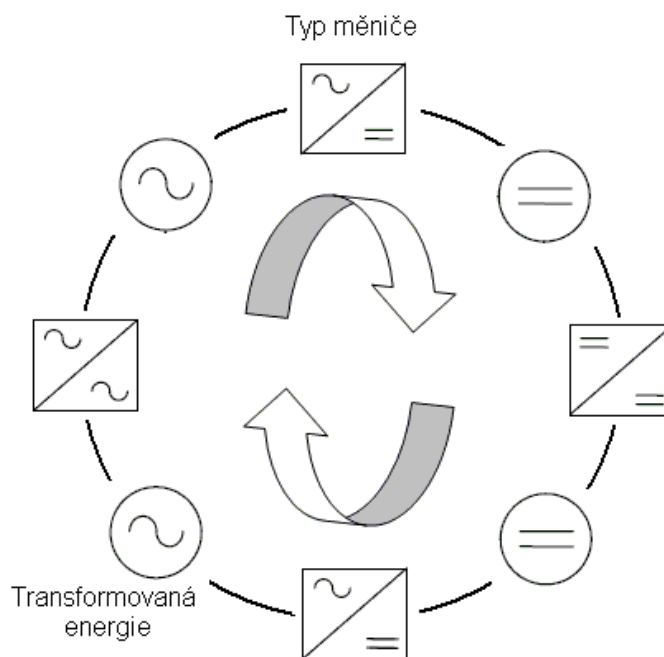


Obr. 1.22: Mechanická charakteristika synchronního motoru [5]

2 TEORETICKÉ VYMEZENÍ POJMU MĚNIČE

2.1 Napájecí měniče elektromotorů

Napájecí měniče elektromotorů mění vstupní elektrickou energii na výstupní elektrickou energii. Jedná se tedy o změnu energie ze střídavé podoby na stejnosměrnou a ze stejnosměrné na střídavou. [8]



Obr. 2.1: Základní typy měničů [5]

Základní rozdělení je prováděno podle způsobu komutace: [8]

- s vnější komutací,
- s vlastní komutací,
- bez komutace.

Dále jsou měniče rozděleny podle funkce: [8]

- Střídavý měnič
 - kmitočtu,
 - napětí,
 - impedance,
 - počtu fází.
- Stejnosměrný měnič
 - odporu,

- napětí.

Měniče se také dělí podle řízení toku energie na řízené a neřízené a podle směru toku energie na energeticky jednosměrné a dvojsměrné. [8]

Podle způsobu transformace energie lze také dělit na: [8]

1. Pulzní měniče (DC/DC měniče)
2. Usměrňovač (AC/DC měnič)
3. Střídač (DC/AC měnič)

Vnější komutace

Charakterizuje se zdrojem komutačního napětí. Tento zdroj je umístěn uvnitř měniče. Vnější komutaci se také jinak říká přirozená komutace. [8]

Vlastní komutace

Charakterizuje se rovněž zdrojem komutačního napětí. Tento zdroj je umístěn v obvodu měniče. Vlastní komutaci se také jinak říká nucená komutace. [8]

Přímá komutace (jednostupňová)

Takováto komutace probíhá v jednom taktu z jedné hlavní větve na druhou. [8]

Nepřímá komutace (dvoustupňová, víceetupňová)

Takováto komutace probíhá ve dvou taktech. V taktu prvním komutuje proud z hlavní větve na vedlejší větev, v druhém taktu komutuje z vedlejší větve na druhou hlavní větev. [8]

2.2 Pulzní měniče (DC/DC měniče)

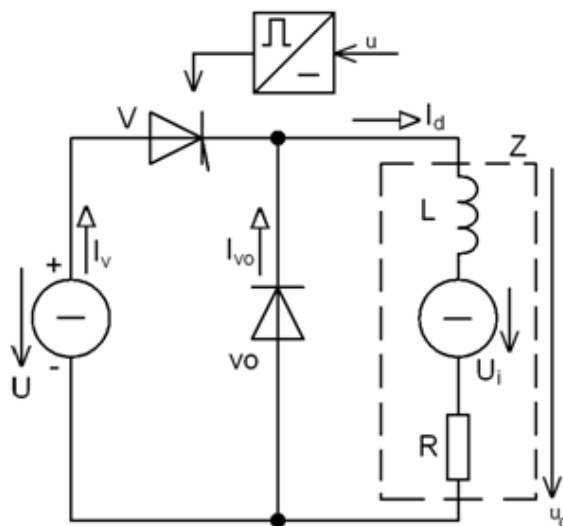
Pulzní měniče jsou využívány pro: [9]

- snižování napětí,
- zvyšování i snižování napětí,
- pulzní řízení odporu.

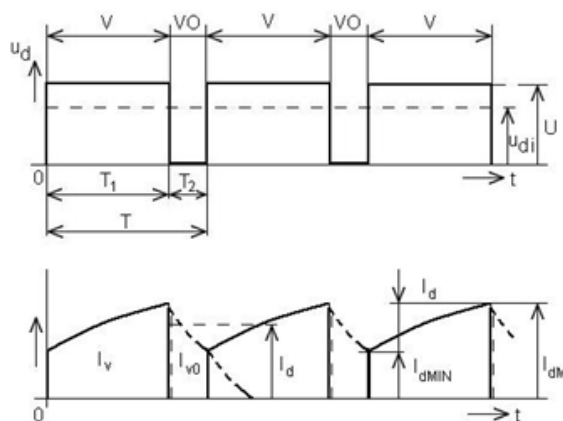
V případě pulzních měničů se využívá periodicky spínaný polovodičový spínač. Další možností u stejnosměrných měničů je, že se vstupní neměnné napětí nejprve rozstřídá a poté se řízeným usměrňovačem usměrní. Výstupem je stejnosměrné napětí s možností řízení. Toto řízení ve srovnání s řízením pulzním měničem je příliš nákladné a nevyhovující. [9]

2.2.1 Snižování napětí

Měnič pro snižování napětí je konstrukčně tvořen polovodičovým spínačem, polovodičovou diodou a zátěží. Díky spínači a nulové diodě měnič řídí napětí na zátěži. A to na hodnotu menší než-li je samotné napájecí napětí zdroje. Podmínkou správné funkce je $U_i < U$. [9]



Obr. 2.2: Pulzní měnič pro snižování napětí, schéma [9]



Obr. 2.3: Pulzní měnič pro snižování napětí, průběhy proudu a napětí [9]

Princip činnosti

V případě kdy je spínač v sepnutém stavu, je napětí na zátěži rovno napětí na vstupu. Podobně i proud zátěže, se uzavírá přes spínač, tzn., že proud spínače je roven proudu na zátěži. Křivka proudu je tvořena exponenciálou, která narůstá hodnotě I_d . Pokud

však, ale nestačí proud I_d klesnout k nule, tak je nepřerušovaný. Z toho plyne, že v celém intervalu vypnutí je napětí na zátěži rovno 0. [9]

Střední hodnota napětí je dána vztahem:

$$U_{di} = \frac{T_1}{T} U = zU \quad (2.1)$$

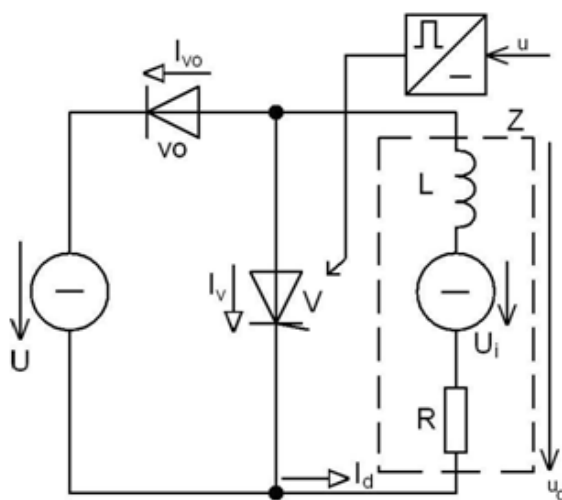
Střední hodnota proudu v ustáleném stavu vychází z předpokladu, že v ustáleném stavu je střední hodnota napětí na cívce rovna nule, pak platí:

$$I_d = \frac{U_{dt} - U_i}{R} \quad (2.2)$$

Výkon se přenáší pouze ze zdroje vstupního napětí do zátěže. Pakliže je spínač sepnut, přijímá zátěž energii ze zdroje. Část této energie se akumuluje v cívce, část energie přijímá zdroj U_i a část energie se ztrácí v rezistoru. [9]

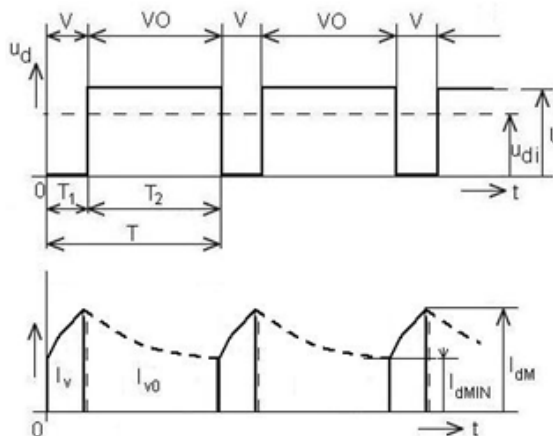
2.2.2 Zvyšování napětí

Nastávají situace, kdy je zapotřebí energii převádět ze zdroje nižšího do zdroje vyššího napětí. Takovou to situaci demonstruje příklad generátorického brzdění stejnosměrného motoru elektromobilu. Ve stavu motorickém je motor elektromobilu napájený bateriemi. V případě brzdění je napětí kotvy menší, než je napětí baterie, do které má být energie rekuperována. [9]



Obr. 2.4: Pulzní měnič pro zvyšování napětí, schéma [9]

Měnič pro snižování napětí je konstrukčně tvořen polovodičovým spínačem, polovodičovou diodou a zátěží. Měnič pro zvyšování napětí umožňuje rekuperaci energie ze zátěže zpět do vstupního zdroje napětí.



Obr. 2.5: Pulzní měnič pro zvyšování napětí, průběhy proudu a napětí [9]

Princip činnosti

V případě sepnutého spínače zamezuje zkratu vstupního zdroje dioda a to vzhledem k její polaritě, zátěž je, ale ve zkratu. Křivka proudu je tvořena exponenciálou, která se blíží hodnotě U/R . Část energie odčerpané ze zátěže se ztrácí v rezistoru, část této energie se akumuluje v cívce. V případě kdy by se přerušil spínač, se proud nepřerušuje a to především díky cívce. Tento proud pokračuje přes diodu přímo do zdroje vstupního napětí. Jestliže by se stalo, že proud I_{dm} by nestačil klesnout k nule, pak je nepřerušovaný. v momentě kdy proud je nepřerušovaný, je v celém intervalu vypnutí napětí zdroje rovno napětí na zátěži. V tomto intervalu vypnutí je pak energie odčerpávána zdrojem U_i a indukčností (cívkou) L . Částečná energie se ztrácí na rezistoru a zbývající energie je převáděna a navracena zpět vstupnímu zdroji. [9]

Střední hodnota napětí je vyjádřena vztahem: [9]

$$U_{dt} = \frac{T_2}{T}U = \frac{T - T_1}{T}U = (1 - z)U \quad (2.3)$$

Střední hodnota proudu vychází z předpokladu, že střední hodnota napětí na cívce je nulová.

$$I_d = \frac{U_i - U_{df}}{R} \quad (2.4)$$

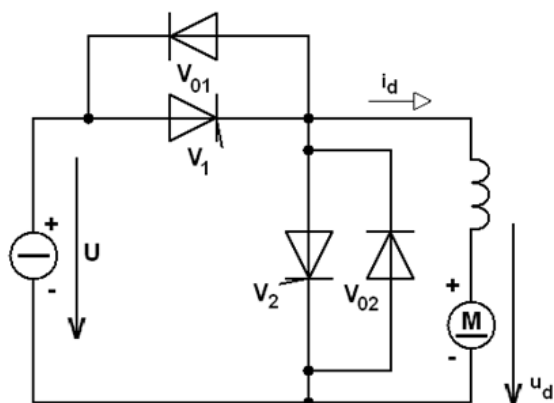
2.2.3 Vícekvadrantové spojení pulzního měniče

Dvoukvadrantové spojení pulzního měniče

Tento měnič se skládá ze dvou typu měničů. Z měniče pro snižování napětí a z měniče pro zvyšování napětí. Takový to měnič je schopen pracovat v I. a II. kvadrantu.

Princip činnosti

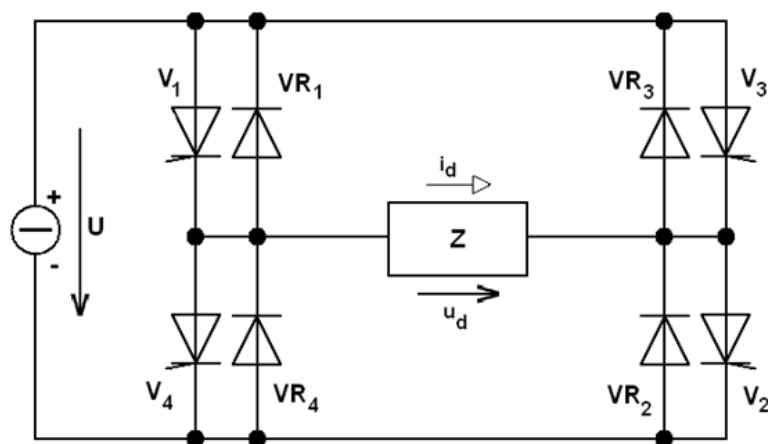
V I. kvadrantu pracuje spínač V_1 a nulová dioda V_{02} , energie je dodávána ze vstupního zdroje napětí U do zátěže. Takto se chová měnič pro snižování napětí. V případě II. kvadrantu je v činnosti V_2 s nulovou diodou V_{01} , energie je dodávána ze zátěže do zdroje. [9]



Obr. 2.6: Dvoukvadrantové spojení pulzního měniče [9]

Čtyřkvadrantové spojení pulzního měniče

Takovýto typ měniče umožňuje práci ve všech čtyřech kvadrantech. Ve všech kvadrantech současně spíná jedna dvojice spínačů nebo jedna dvojice diod. [9]



Obr. 2.7: Spínací diagram čtyřkvadrantového spojení pulzních měnič [9]

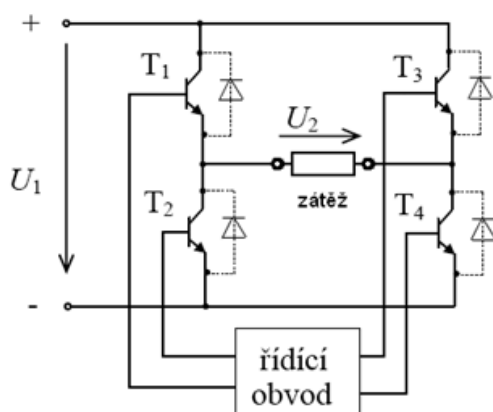
2.3 Napěťový střídač (DC/AC měnič)

Střídač je nejčastěji používány měnič. Tento elektronický přístroj má za úkol převádět stejnosměrné napětí (proud) na střídavé napětí (proud). Celý tento proces zajišťují polovodičové řídicí prvky. Získané střídavé napětí (proud), můžeme dále transformovat na potřebnou výstupní hodnotu pomocí transformátoru. [9]

Základní rozdělení

- Podle napájecího zdroje – napěťový, proudový,
- Podle počtu fází – jednofázový trojfázový,
- Podle typu spojení – můstkové, uzlové.

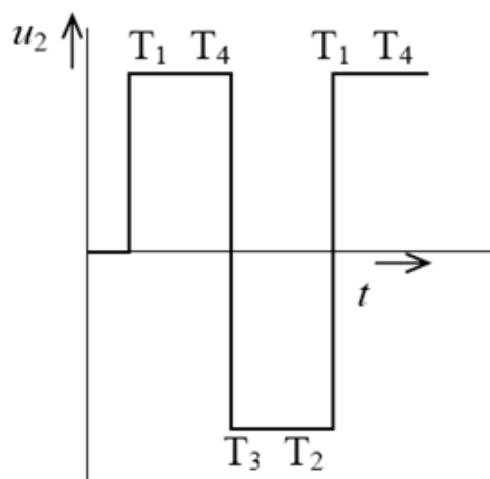
2.3.1 Jednofázový můstkový střídač



Obr. 2.8: Schéma jednofázového můstkového střídače [5]

Princip činnosti

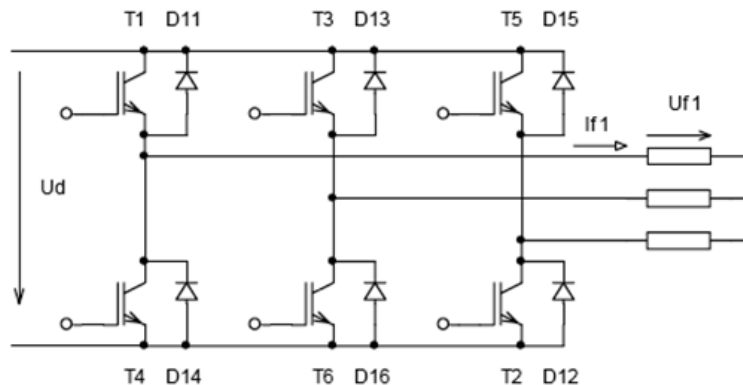
Z průběhu napětí je patrné, že na začátku je napětí nulové. V této chvíli není sepnut žádný z tranzistorů. Poté se sepnou tranzistory T_1 a T_4 , pak je na zátěži kladné napájecí napětí. Po chvíli se tranzistory T_1 a T_4 vypnou díky řídicímu obvodu. V ten samý čas se začnou spínat tranzistory T_3 a T_2 , pak je na zátěži záporné napájecí napětí. Takto se opakuje střídání spínání a vypínání jednotlivých dvojic tranzistorů. V případě řízení efektivní hodnoty napětí na zátěži je zapotřebí mezi přepnutím dvojic tranzistorů docílit krátké prodlevy, po jejíž dobu budou všechny čtyři tranzistory vypnuty. Polovodičové diody v zapojení slouží jako ochrana proti přepólování.



Obr. 2.9: Výstupní obdelníkový průběh napětí [5]

V sepnutém stavu střídače nesmí dojít k tomu, aby se najednou spustili tranzistory T_1 a T_2 nebo T_3 a T_4 . V takovém případě by nastal v obvodu zkrat. [5]

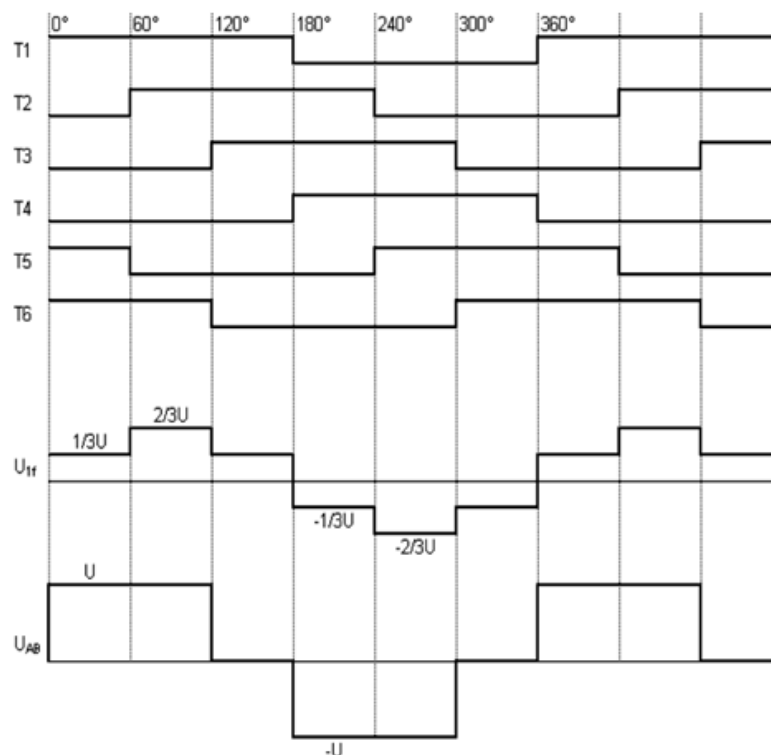
2.3.2 Trojfázový střídač



Obr. 2.10: Schéma trojfázového střídče [5]

Princip činnosti

Trojfázový střídač se skládá ze spínacích prvků, kterými jsou tranzistory T_1 až T_6 a polovodičových diod D_{11} až D_{16} , které plní funkci zpětných diod spínačů. Zátěž je v případě trojfázového střídače spojena do hvězdy bez vyvedeného uzlu. Jednotlivé spínače T_1 až T_6 je nutno spínat se vzájemným fázovým posunem, který činí 60° . V takovém případě bude vypnutí spínače probíhat s fázovým zpožděním. [5]



Obr. 2.11: Spínací charakteristika a průběh sdruženého a fázového napětí [5]

Využití střídačů

Využívají se v aplikacích, kde potřebujeme především stejnosměrné napětí, ale potřebujeme využívat také napětí střídavé. Takovým příkladem je například zdroj UPS, kdy z baterie napájíme spotřebič na střídavé napětí. [9]

2.4 Usměrňovač (AC/DC měnič)

Usměrňovač je elektronický přístroj, který mění střídavou elektrickou energii na stejnosměrnou. Z toho plyne, že výstupní složka usměrňovače nabývá kladných hodnot. [9]

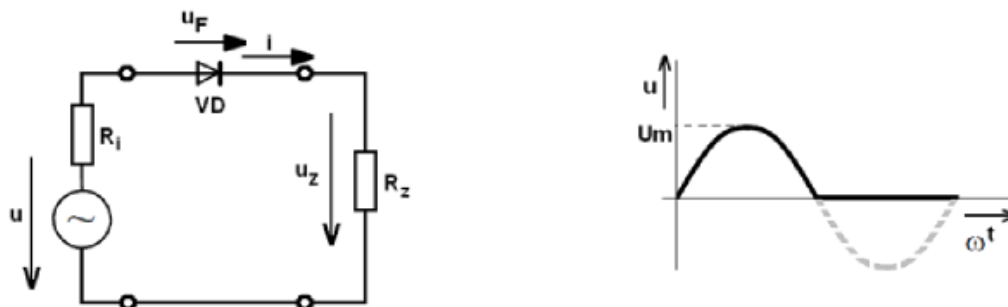
Rozdělení dle počtu fází

- jednofázové (malá zařízení),
- trojfázové (velká zařízení, např.: ss motory).

Rozdělení dle zapojení

- jednocestné,
- dvoucestné,
- můstkové.

2.4.1 Jednocestný usměrňovač



Obr. 2.12: Jednocestný můstkový usměrňovač a jeho průběh [9]

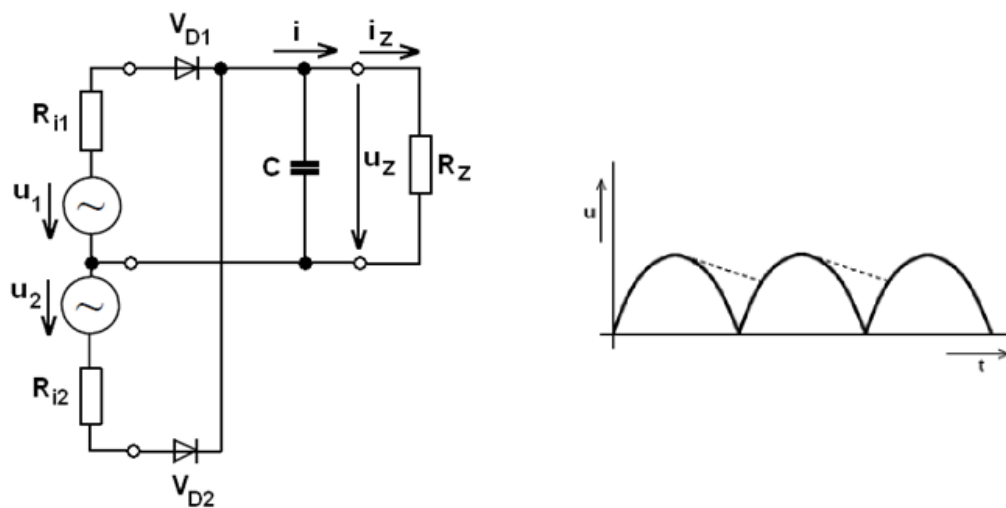
Princip činnosti

Jednocestný usměrňovač využívá polovodičových vlastností polovodičové diody. Tato dioda vede proud v případě, že je zapojena do obvodu v propustném stavu. Tedy při průchodu střídavého proudu dioda propouští pouze kladné půlvlny. Tohoto usměrňovače se využívá v jednodušších aplikacích. Nevýhodou filtru je především vysoké zvlnění usměrněného napětí. Toto zvlnění se dá eliminovat pomocí filtru, kondenzátoru. [9]

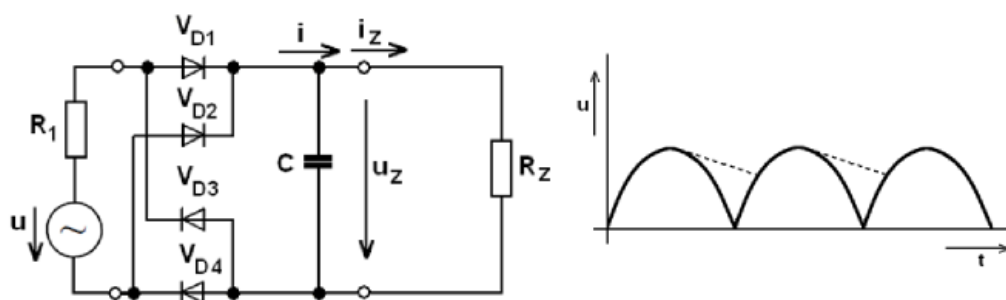
2.4.2 Dvoucestný usměrňovač

Princip činnosti

Dvoucestný usměrňovač využívá dvou polovodičových diod, přičemž každá z nich usměrňuje kladnou půlvlnu. Proud i_1 prochází přes diodu V_{D1} na zátěž R_z a zpět do zdroje, usměrňovač usměrňuje kladnou půlvlnu. Pak proud i_2 prochází přes diodu V_{D2} na zátěž R_z a zpět do zdroje. Na průběhu dvoucestného usměrňovače vidíme jak kondenzátor v obvodu částečně vyhlazuje průběh a funguje tedy jako filtr. [9]



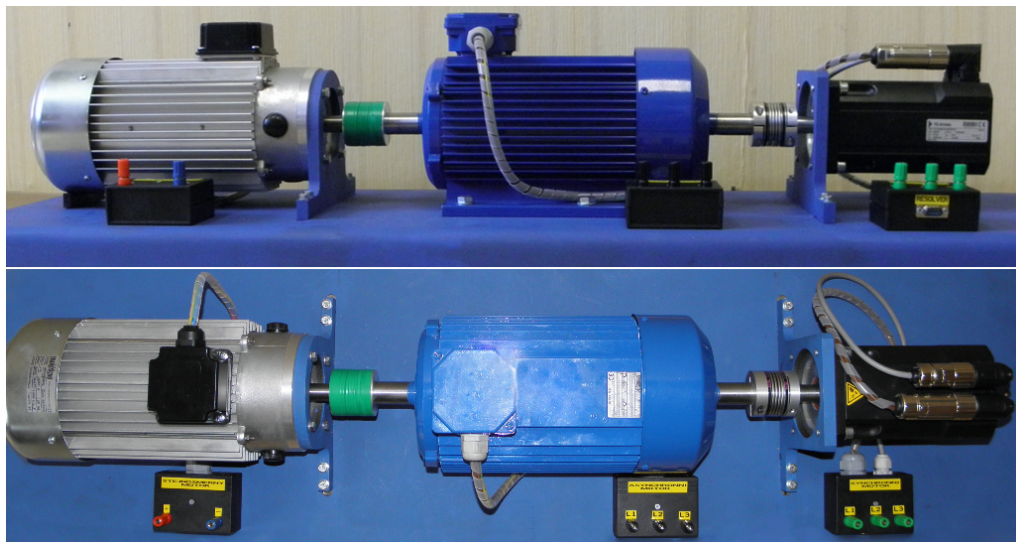
Obr. 2.13: Dvoucestný usměrňovač a jeho průběh [9]



Obr. 2.14: Dvoucestný můstkový usměrňovač a jeho průběh [9]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část práce se zabývá měřením na univerzálním motorovém systému 3.1 a je rozdělena do tří laboratorních úloh.



Obr. 3.1: Univerzální motorový systém

3.1 Měření asynchronního motoru se střídačem

3.1.1 Zadání měření

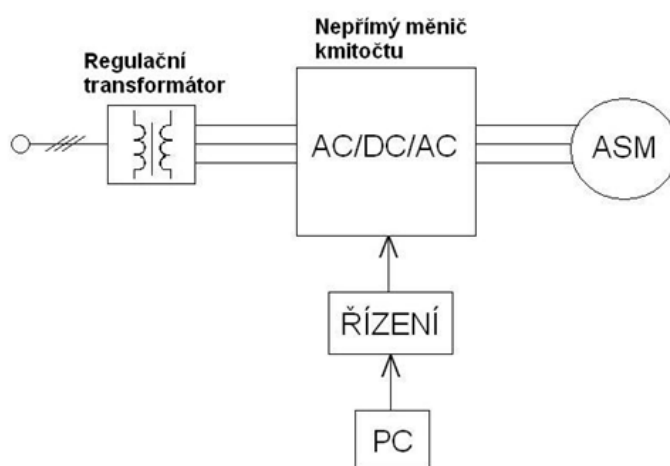
1. Na motorovém systému změřte:
 - Fázové proudy při rozběhu na 25 Hz a 50 Hz spínací frekvence 10,6 kHz.
 - Fázové proudy při spínacích frekvencích 5,3 kHz, 10,6 kHz, 15,9 kHz.
 - Fázový proud I_{R1} a U_{DC} napětí meziobvodu.



Obr. 3.2: Asynchronní motor použitý k laboratorní úloze

2. Měření asynchronního motoru bez zátěže (naprázdno):
 - Při změně frekvence od 10 – 60 Hz.
 - Změřte proud I , napětí U_f , U_{SDR} , napětí meziobvodu U_{DC} a otáčky n .
3. Měření asynchronního motoru se zátěží. Zátěž bude tvořit stejnosměrný motor, který bude v režimu brzdění do odporu, jehož odpor bude postupně měněn.
 - Budeme měřit napětí na odporníku U_R , proud I_R a otáčky n , při frekvencích 30, 40 a 50 Hz.
 - Dopotítáme námi měněný odpor.

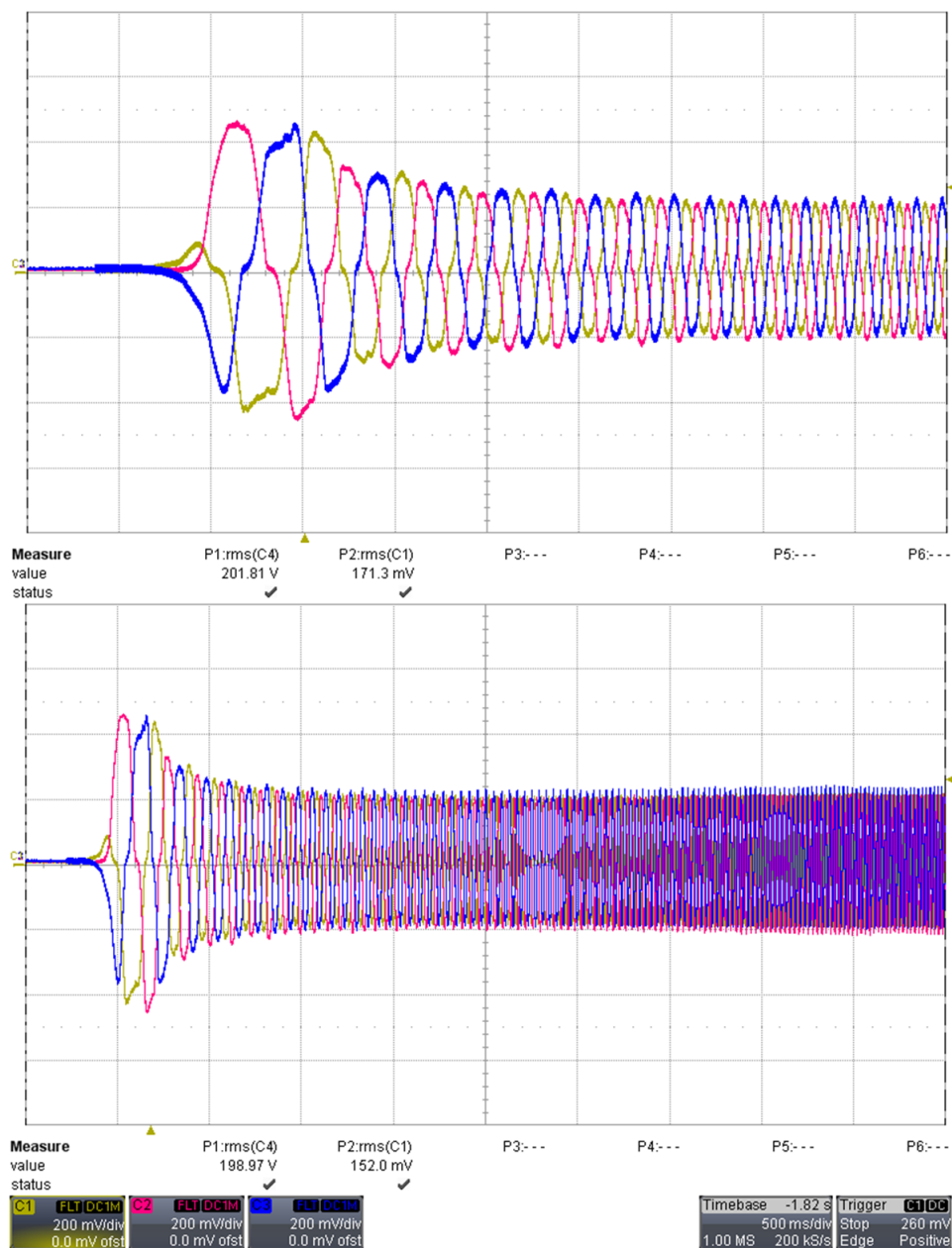
3.1.2 Blokové schéma



Obr. 3.3: Blokové schéma měření asynchronního motoru se střídačem

3.1.3 Měření na motorovém systému

Změřené průběhy fázových proudů při rozběhu motoru

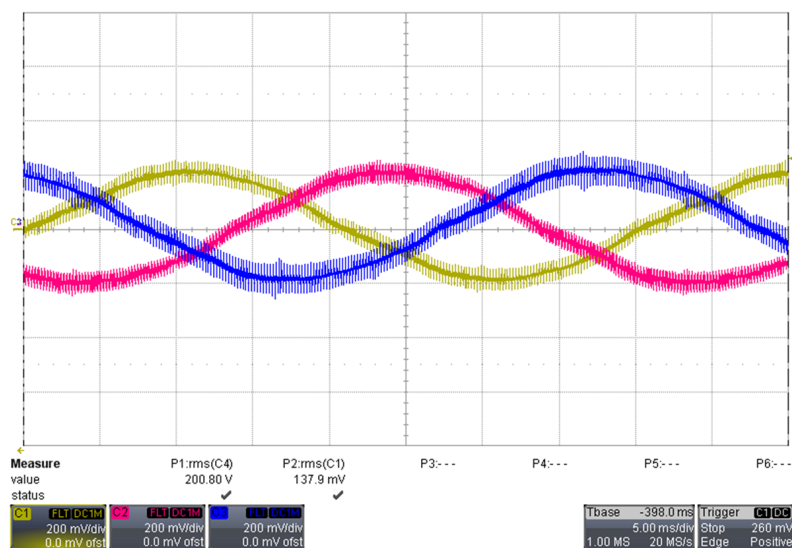


Obr. 3.4: Změřené průběhy fázových proudů při rozběhu na 25 Hz (nahoře) a 50 Hz (dole) spínací frekvence 10,6 kHz

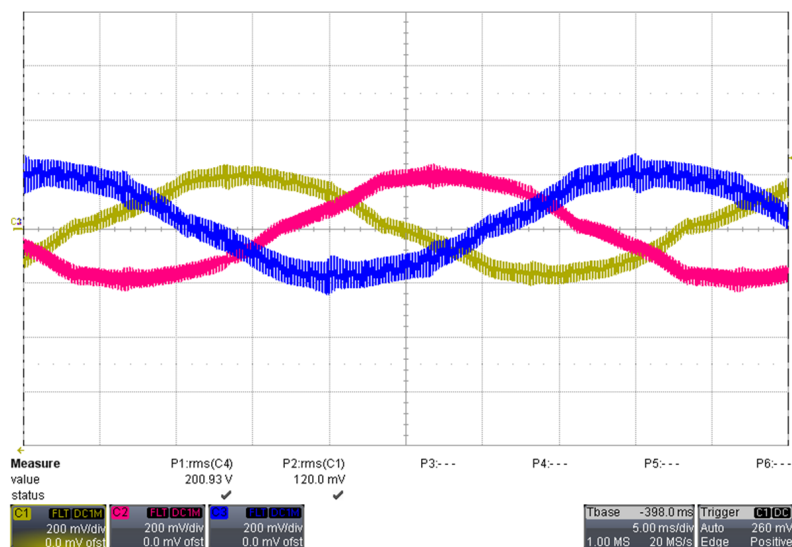
Závěr

Na průběhu 3.4 je patrný rozběh motoru z klidu. Na počátku je viditelný zákmit, který je způsoben rozběhem motoru, kdy motor je více zatížen. Jeho zatížení je dáno především permanentními magnety stejnosměrného motoru. Proud při rozběhu je přibližně 2,25A, což jsme odečetli z průběhu, kde platí, že jeden dílek je roven 1A.

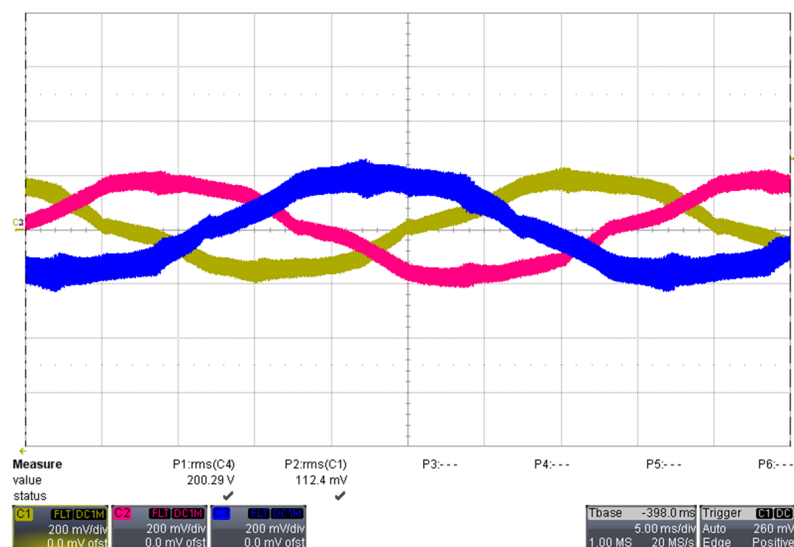
Změřené průběhy fázových proudů při různých spínacích frekvencích



Obr. 3.5: Průběh napětí pro nízké spínací frekvence 5,3 kHz

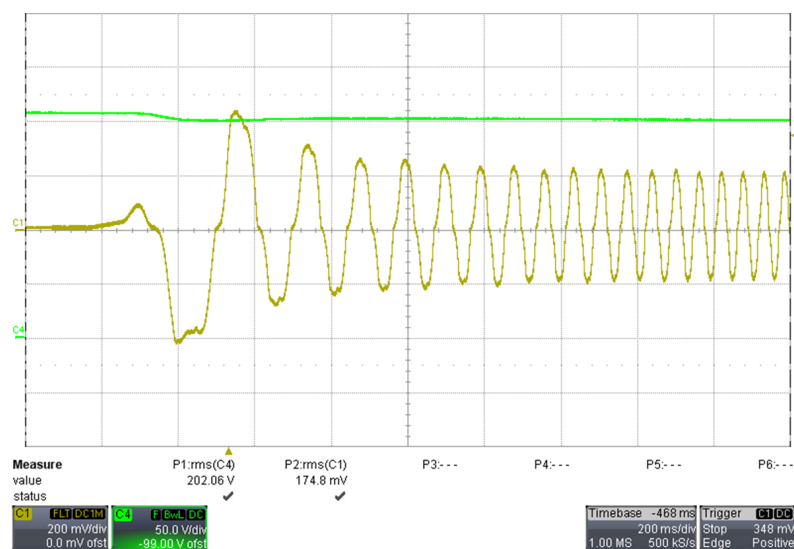


Obr. 3.6: Průběh napětí pro střední spínací frekvence 10,6 kHz



Obr. 3.7: Průběh napětí pro vysoké spínací frekvence 15,9 kHz

Změřený průběh jednoho fázového proudu I_{R1} a napětí meziobvodu U_{DC}



Obr. 3.8: Průběh fázového proudu I_{R1} a napětí meziobvodu U_{DC} , při rozběhu motoru na prázdkno

Závěr

V grafech 3.5, 3.6, 3.7 jsou průběhy výstupních proudů přizpůsobených pro různé spínací frekvence měniče. Průběh 3.5 je typický pro malé spínací frekvence, kde vidíme vysokou zakmitanost křivky amplitudy. Na průběhu 3.6 lze vidět průběh pro střední spínací frekvence, v němž je patrné, že proti průběhu 3.5 je amplituda méně zakmitaná. Na průběhu 3.7 vidíme průběh pro vysoké spínací frekvence a zde má již průběh vzhled téměř perfektní sinusové křivky. Z toho tedy plyne že, čím vyšší je spínací frekvence, tím lepší je signál na svorkách motoru. Důležité je dodat, že vysoké spínací frekvence mají za následek výrazné oteplování motoru, což je dáno ztrátami, které rostou se spínací frekvencí.

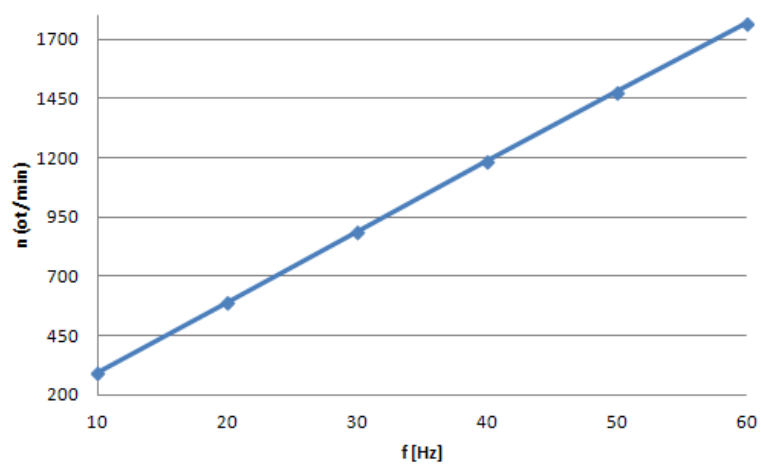
Dále v grafu 3.8 je znázorněn průběh jednoho z fázového proudu při rozběhu motoru. Na počátku je patrný zákmit proudu při zatížení a pozdější ustálení hodnoty proudu. V danou chvíli při rozběhu byl proud po odečtení z grafu 2,2A. V průběhu také vidíme zelenou křivku, jenž nám znázorňuje pokles napětí meziobvodu při sepnutí motoru.

3.1.4 Měření asynchronního motoru naprázdno

Předmětem tohoto měření bylo sledovat, jak se mění proud, napětí a především otáčky motoru v závislosti na změně frekvence.

f [Hz]	I [A]	U_f [V]	n [ot/min]	U_{DC} [V]	U_{SDR} [V]
10	1,75	74,5	298	202	42
20	1,34	52	593	202	92
30	1,24	61,5	890	201	106
40	1,21	68,3	1188	199	117
50	1,15	70	1480	198	120
60	1,22	68,5	1767	197	118

V grafu 3.9 vidíme závislost otáček na změně frekvence. S navyšující se frekvencí rostou otáčky motoru. To platí také pro sdružené napětí. Frekvenční rozsah 10–60 Hz byl volen proto, neboť běžné elektromotory jsou konstruovány právě na takovýto rozsah.

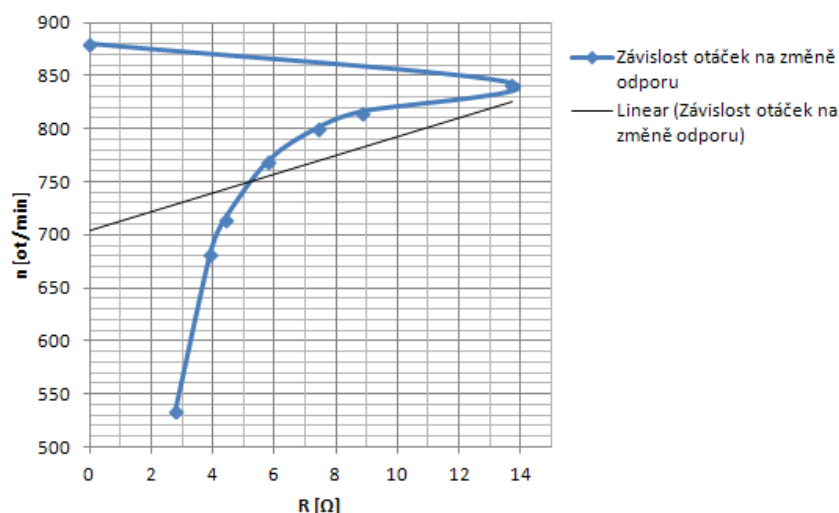


Obr. 3.9: Závislost otáček na změně frekvence

3.1.5 Měření asynchronního motoru se zátěží

Měření pro frekvenci 30 Hz, napětí meziobvodu 202 V

f [Hz]	n [ot/min]	U [V]	R [Ω]	I [A]
30	880	0	0	0
30	843	32,92	13,71	2,4
30	816	30	8,83	3,4
30	801	28,63	7,42	3,86
30	770	26,2	5,81	4,51
30	715	22,75	4,39	5,18
30	683	21,15	3,92	5,4
30	535	14,74	2,78	5,3

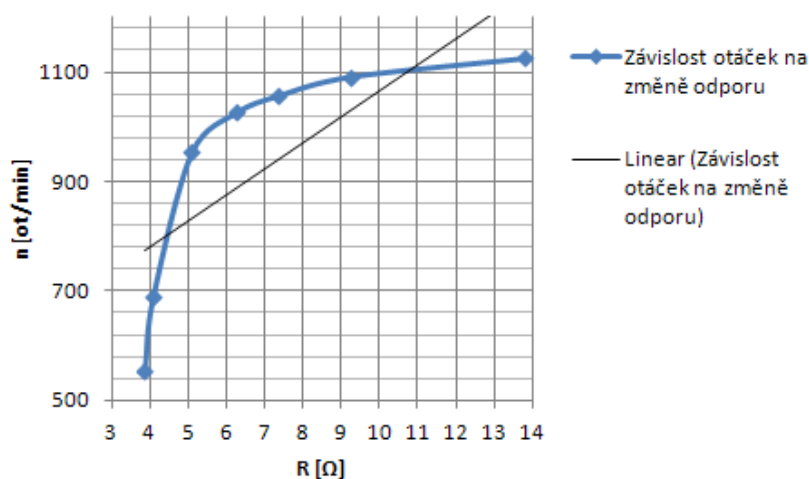


Obr. 3.10: Závislost otáček na změně odporu, 30Hz

Při měření s frekvencí 30 Hz je vidět jak nám tato nízká frekvence omezuje maximální otáčky motoru, což budeme postupně srovnávat s ostatními měřeními pro 40 a 50 Hz. Z grafu jde vidět, jak závisí rychlost otáčení rotoru na změně odporu. Při nulovém odporu jsou otáčky maximální, tedy 880 ot/min a naopak při odporu 2,78 Ω jsou nízké. Níže jsme již s odporem nemohli pokračovat, jelikož v tu dobu by rotor motoru již stál. To, že při brzdění motoru a tedy nejnižších otáčkách 535 ot/min, je hodnota odporu nejmenší, je dáno tím, že stejnosměrným motorem, který je brzděn odporníkem, brzdíme asynchronní motor, jenž se v tu chvíli chová jako dynamo. Z toho plyne, že se na něm indukuje napětí a to nám ovlivňuje velikost odporu.

Měření pro frekvenci 40Hz, napětí meziobvodu 202V

f [Hz]	n [ot/min]	U [V]	R [Ω]	I [A]
40	1125	44,2	13,81	3,2
40	1091	40,68	9,24	4,4
40	1057	38,05	7,37	5,16
40	1026	35,86	6,27	5,72
40	953	31,81	5,09	6,24
40	689	21,8	4,08	5,34
40	553	17,13	3,86	4,43

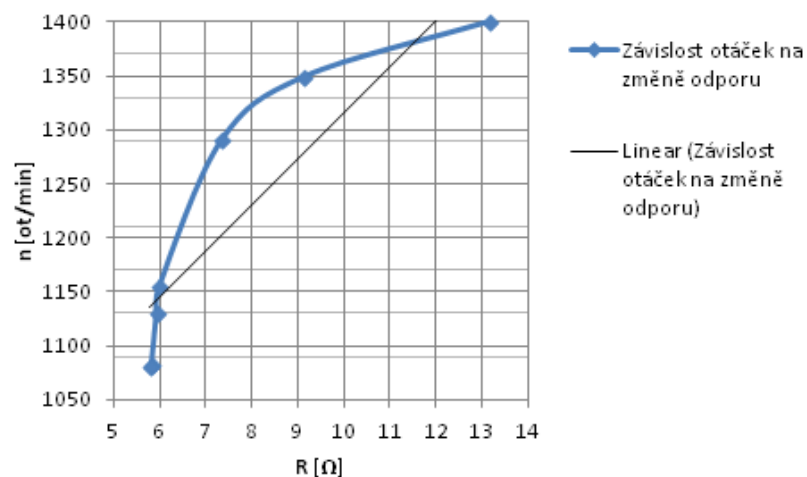


Obr. 3.11: Závislost otáček na změně odporu, 40Hz

Při měření s frekvencí 40Hz je z tabulky patrné, že otáčky motoru jsou vyšší, než tomu bylo u frekvence 30 Hz. Důvod, proč otáčky spolu s odporem klesají, je stejný, jako tomu je u prvního měření. Zajímavé jsou poslední dvě hodnoty tohoto měření, kde můžeme sledovat, jak hodnoty proudu náhle klesají, místo aby proud narůstal. To, že proud klesl, je dáno především malými otáčkami rotoru a také nízkým napětím.

Měření pro frekvenci 50Hz, napětí meziobvodu 202V

f [Hz]	n [ot/min]	U [V]	R [Ω]	I [A]
50	1400	54,8	13,17	4,16
50	1349	50,26	9,15	5,49
50	1290	46,41	7,35	6,31
50	1155	39,95	6	6,67
50	1130	39,2	5,94	6,58
50	1082	37,58	5,83	6,44
50	1080	37,1	5,8	6,39



Obr. 3.12: Závislost otáček na změně odporu, 50Hz

Od dvou předešlých měření se toto měření liší pouze vyšší frekvencí, která má za následek vyšší otáčky rotoru.

Výpočet momentu a skluzu z nominálních hodnot

Štítkové hodnoty asynchronního motoru:

- $P_n = 1,5 \text{ kW}$,
- $n_n = 1410 \text{ ot/min}$
- $I_n = 10,7$
- $U_n = 127 \text{ V}$
- $f = 50 \text{ Hz}$
- $M_n = 10,2 \text{ Nm}$

Na základě štítkových hodnot dosadíme do vztahů [5] a vypočteme.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{Pn}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = \frac{1500}{\frac{2\pi \cdot 1410}{60}} = 10,159 \text{ Nm} \quad (3.1)$$

$$M_{MAXn} = M_n \cdot q_M = 10,159 \cdot 2,5 = 25,4 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

$$s_n = \frac{n_{0n} - n_n}{n_{0n}} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06 \quad (3.3)$$

$$s_{Kn} = s_n \left(q_M + \sqrt{q_M^2 - 1} \right) = 0,06 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,28 \quad (3.4)$$

Z těchto výpočtů jsme získali nominální moment, který je roven 10,16 Nm a hodnotu nominálního skluzu zvratu 0,28.

3.2 Měření stejnosměrného motoru s pulzním měničem

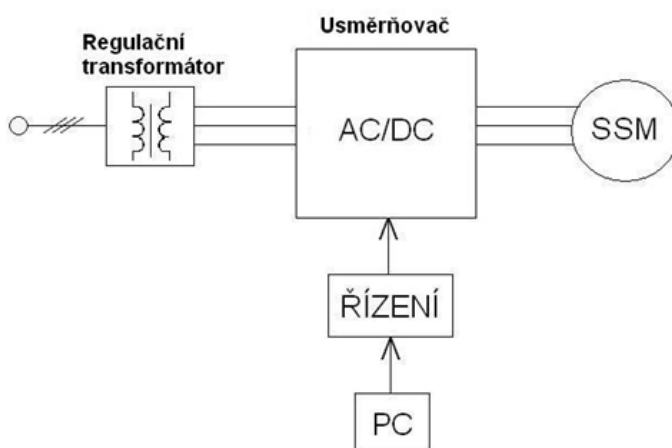
3.2.1 Zadání měření

1. Při měření s pulzním měničem měňte velikost střídavy od 20% do 80% a pozorujte co se děje s napětím a proudem.
2. Při střídě 50% měňte spínací frekvenci od 500 Hz – 20 kHz pozorujte závislost mezi napětím U , proudem I a změnou otáček motoru.



Obr. 3.13: Stejnosměrný motor použitý pro tuto úlohu

3.2.2 Blokové schéma



Obr. 3.14: Blokové schéma měření stejnosměrného motoru na pulzním měniči

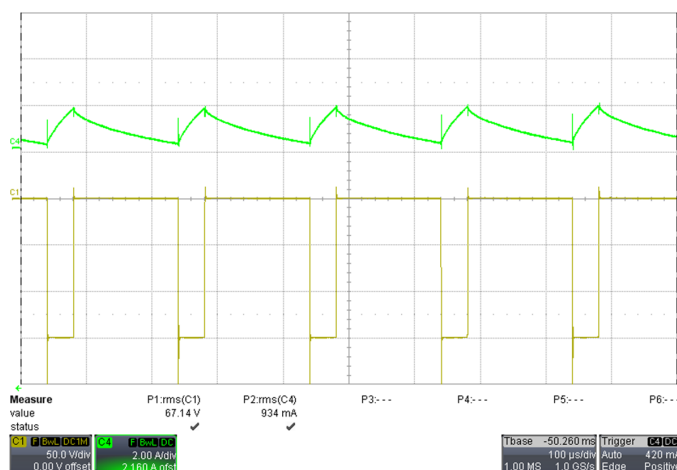
3.2.3 Měření - úkol 1

Střída je poměr časů ve, kterých se signál nachází. Určuje se tedy u periodických signálů, které se za dobu periody nacházejí v obou úrovních. Střídu udáváme buďto jako poměr například 1:1 nebo jako procentuální hodnotu například 80%. Poměr 1:1 znamená, že obě úrovně signálu mají dobu trvání stejnou. V případě, že je střída udávána v procentech pak se jedná o dobu trvání úrovní vůči periodě signálu.

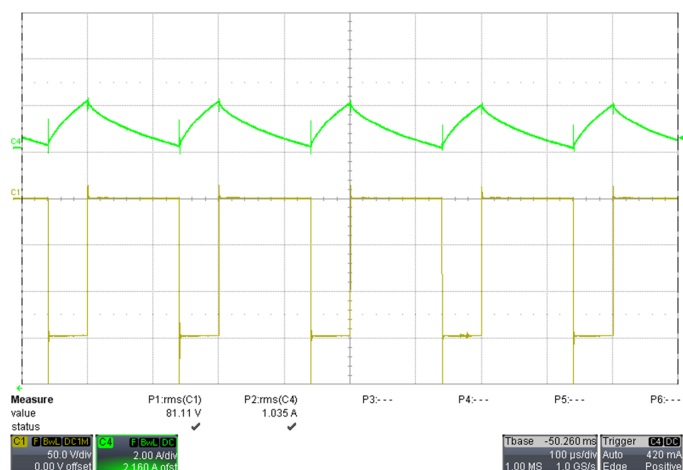
Střídu počítáme dle vztahu

$$D = \frac{\tau}{T} \text{ kde} \quad (3.5)$$

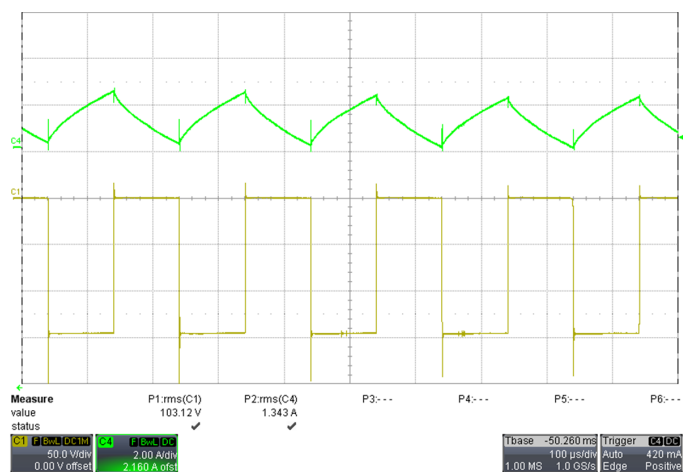
- τ je délka pulzu
- T je délka periody



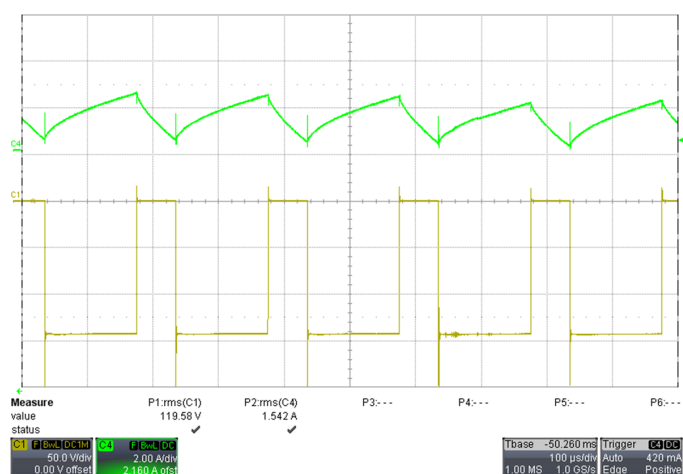
Obr. 3.15: Průběh napětí a proudu za usměrňovačem, střída 80%



Obr. 3.16: Průběh napětí a proudu pro hodnotu střidy 70%



Obr. 3.17: Průběh napětí a proudu pro hodnotu střidy 50%



Obr. 3.18: Průběh napětí a proudu pro hodnotu střidy 20%



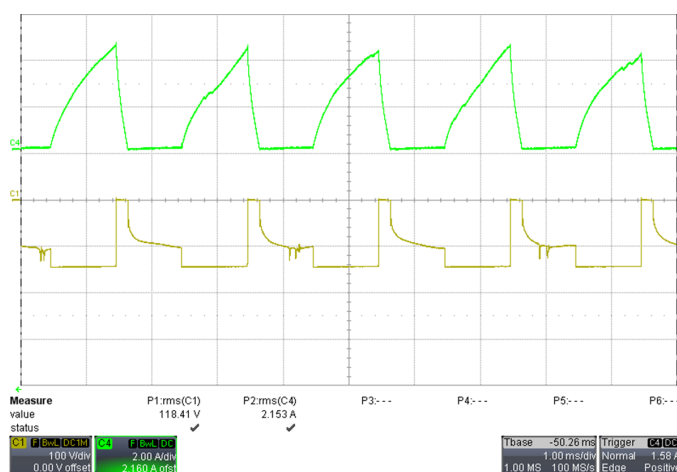
Obr. 3.19: Průběh napětí a proudu pro náhlou změnu střídavy z 20% na 80%

Závěr měření - úkol 1

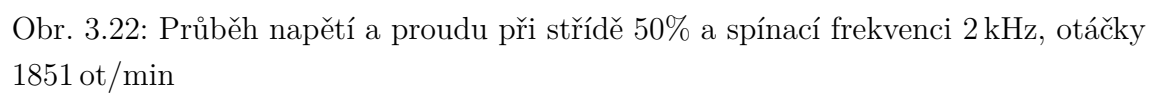
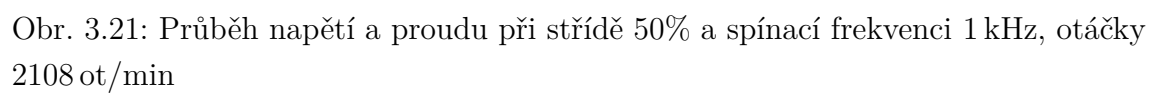
První průběh je měřen při napětí 152V za usměrňovačem a spínací frekvence je 5kHz. Z výše uvedených průběhu lze sledovat, jak ovlivňuje změna střídý chod motoru. Při střídě 80% se rotor motoru téměř neotáčí respektive málo. V případě kdy nastavíme střidu 20%, se rotor otáčí rychle. Tato skutečnost vyplývá z obecného poměru „zapnuto/vypnuto“ 0:100, z tohoto poměru vychází, že motor je vypnut (opakem je 100:0, kdy je motor zapnut nastálo). Odtud pak plyne, že v rozmezí střídý 100:0:100 jsme schopni měnit výkon motoru, respektive jeho otáčky. Tedy důvodem, proč se motor při střídě 80% otáčí málo a při střídě 20% otáčí hodně, je právě poměr času periody, tzn. při střídě 50% má motor poloviční otáčky, než jsou otáčky, při střídě 100%. Na průběhu 3.19 je znázorněna rychlá změna střídý z 20% na 80%. Z křivky napětí je patrné generované napětí, které je způsobeno brzděním motoru a motor se na chvíli chová jako dynamo.

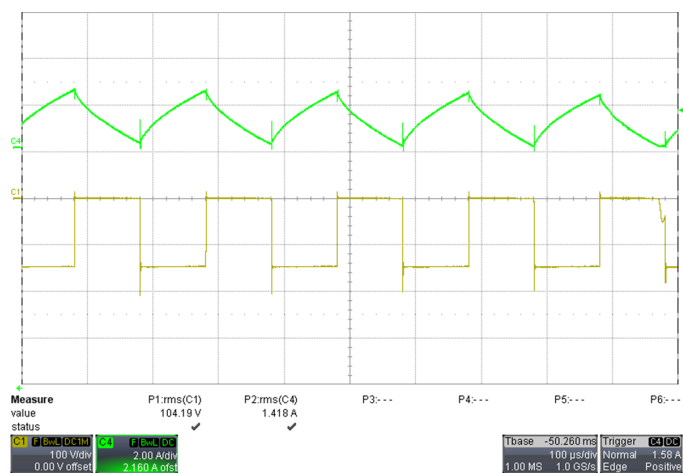
3.2.4 Měření - úkol 2

Při střídě 50% byla měněna spínací frekvence od 500 Hz do 20 kHz a sledovány změny napětí, proudu i otáček motorů.

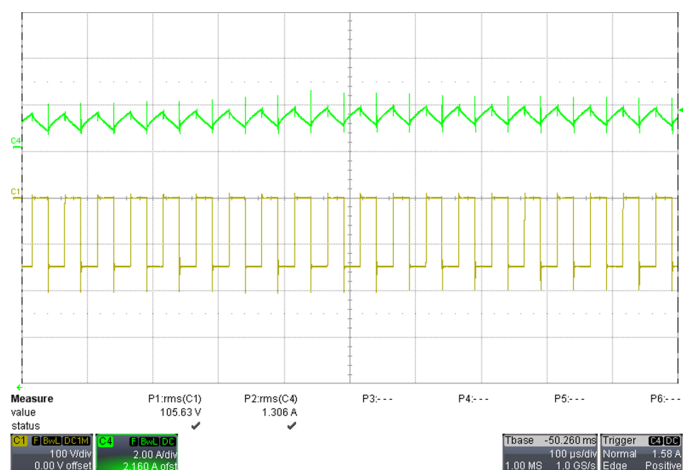


Obr. 3.20: Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 500 Hz, otáčky 2338 ot/min





Obr. 3.23: Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 5 kHz, otáčky 1572 ot/min



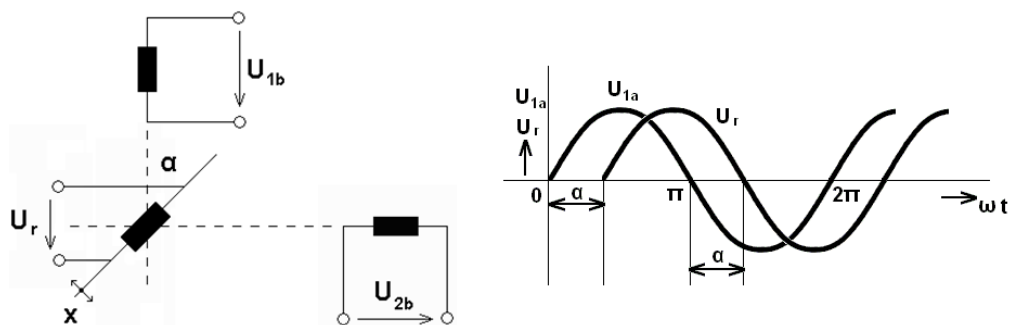
Obr. 3.24: Průběh napětí a proudu při střídě 50% a spínací frekvenci 20 kHz, otáčky 1602 ot/min

Závěr měření - úkol 2

V případě tohoto měření jsem měnil spínací frekvenci a sledoval jsem, co se děje s otáčkami, napětím a proudem. U měření spínací frekvence 500 Hz – 2 kHz je patrné, že na křivce proudu je viditelný nespojitý proud tekoucí indukčností a na křivce napětí vidíme generované napětí. Nespojitý proud se zde projevuje z toho důvodu, že výstupní výkon je menší než je množství energie, která je uložena v indukčnosti vynásobená spínací frekvencí. Nespojitý proud tekoucí indukčností, dosahuje nulové úrovně ještě před ukončením cyklu. Při těchto spínacích frekvencích napětí, proud a otáčky klesají viditelně, při vyšších spínacích frekvencích se napětí, proud a otáčky výrazně nemění. Což je dáno přechodem mezi spojitostí a nespojitostí. Při přepínání spínací frekvence 2kHz a 5kHz vidíme hranici mezi spojitostí a nespojitostí. Tato hranice je definována proudem tekoucím indukčností, který dosahuje nuly ve chvíli, ve které se opět spíná spínací prvek. Abychom mohli vypočítat poměr na zátěži při takovýchto hraničních podmínkách, musíme využít energie, která je uložena za daný cyklus, převedenou na proud I_z tekoucí zátěží. K otáčkám tak můžeme říct, že se zvyšující se spínací frekvencí se otáčky motoru snižují.

3.3 Měření čidla RESOLVER

Resolver je absolutní čidlo polohy, které má jednofázový rotor a na jeho statoru dvě vinutí, která jsou na sebe navzájem kolmá. Tato vinutí jsou napájena střídavým napětím a jsou od sebe posunuta o 90° .

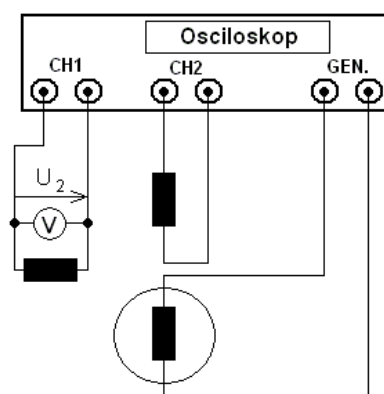


Obr. 3.25: Schéma resolveru a průběhy napětí [5]

3.3.1 Zadání měření

1. Měření závislosti efektivní hodnoty napětí statorových vinutí na úhlu α natočení revolveru. Úhel α se bude měnit například o 30° .
2. Při měření sledujme na osciloskopu průběhy vzájemné polohy napětí resolveru a to při pomalém a rychlém otáčení.

3.3.2 Schéma zapojení



Obr. 3.26: Schéma měření resolveru

3.3.3 Princip činnosti

Vinutí rotoru je napájeno ze zdroje sinusového napětí a to s frekvencí například 500 Hz, 1 kHz. V případě, kdy se změní úhel natočení rotoru, vzhledem k statoru se změní i jejich indukčnost. To má za následek i změnu velikosti napětí indukovaných z rotoru do obou statorových vinutí. Předpokladem je, že pokud se do jednoho ze statorových vinutí indukuje napětí s maximální efektivní hodnotou, pak je indukované napětí ve druhém statorovém vinutí nulové.

3.3.4 Závěr měření

Při měření absolutního čidla polohy bylo zjištěno, že čidlo není zcela funkční, protože bylo dodáno firmou v nefunkčním stavu. Při správné funkci by měl být na osciloskopu zobrazen sinusový průběh, na němž by bylo patrné, jak jsou jednotlivé sinusoidy posunuty vůči sobě o 90° . Při měření tomu tak však nebylo a na osciloskopu nebyl pozorovatelný žádný signál.

3.4 Přístroje použité při měřeních

- Mixed signal oscilloscope LECROY MSO 44MX S-B
- Multimetr AGILENT V1241A
- PC program FREEMASTER
- Regulační transformátor 501067
- Řídící obvod freescale 5000 000
- Univerzální motorový systém

4 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala ověřením funkčnosti univerzálního motorového systému a posléze měřeními na něm. Nejprve však bylo nutné definovat samotný motor a jednotlivé typy, které byly využity pro měření. První dvě kapitoly tak tvoří teoretický základ pro potřeby praktické části. Práce obsahuje principy činností, možnosti řízení otáček a brzdění motorů. Dále jsou definovány možné napájecí měniče pro univerzální motorový systém. Měníče jsou v této práci rozděleny dle typu transformace energie a doplněny principy jejich činnosti, schémata zapojení a jejich výstupními průběhy.

Stěžejní část bakalářské práce, tedy část praktická se zabývá měřeními na jednotlivých motorech. Prvním krokem k úspěchu bylo ověřit funkčnost motorového systému. Funkčnost byla ověřena připojením jednotlivých motorů k příslušným zdrojům napětí. Při tom bylo zjištěno, že nebude možno provést žádné měření na synchronním motoru. Důvodem bylo především to, že tento typ motoru má velký jmenovitý proud a tak se jej nepodařilo uvést do chodu. Roztočení tohoto motoru by bylo možné pouze s příslušným napájecím měničem. Takový typ měniče však nebyl k dispozici. Synchronní motor, který byl k měření využit, nabízí možnost měření absolutního čidla polohy SELSYN. Jelikož čidlo SELSYN bylo dodavatelem dodáno nefunkční, nebylo možné proměřit jeho princip činnosti. Možnosti měření tohoto čidla jsou však uvedeny ve třetí podkapitole praktické části.

Dalším motorem pro měření byl asynchronní motor, na kterém proběhla například měření v případě různých spínacích frekvencí nebo změna otáček motoru při změně frekvence bez zatížení motoru. Zajímavým měřením bylo měření, kdy byl asynchronní motor zatěžován motorem stejnosměrným, který byl brzděn do odporu. Všechny naměřené hodnoty byly zapsány do příslušných tabulek a měření bylo rozšířeno o výpočet nominálních hodnot momentu a skluzu.

Posledním typem motoru, na kterém bylo prováděno měření, byl stejnosměrný motor, u kterého bylo měřeno, co se děje s napětím a proudem při změně střídavé frekvence. Dále následovalo měření, při kterém byla střída konstantní a měnila se pouze spínací frekvence.

Cílem této bakalářské práce bylo ověřením funkčnosti univerzálního motorového systému, jeho začlenění do laboratoře a vypracování laboratorních úloh. Všechny zmíněné body byly splněny.

Tento univerzální motorový systém se dá rozšířit o mnoho jiných laboratorních úloh. Především by mohl být základem diplomové práce na téma řešení napájecího měniče synchronního motoru tak, aby i na tomto typu motoru mohla být v budoucnu prováděna měření.

LITERATURA

- [1] BASTIAN, P. *Praxis Elektrotechnik*. Německo, 2006. ISBN 80-86706-15-X
- [2] HUGHENS, J. *Velká obrazová všeobecná encyklopedie*. Praha: Svojtka&Co, 2007, Aktualizované vydání, 792 s., ISBN: 978-80-7352-823-2 K. Kocman .
- [3] KOCMAN, K. *Elektrické stroje a přístroje 1*. Nakladatelství technické literatury, 1990, 420 s., ISBN: 978-80-0300-406-5
- [4] MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje 3.*. Bratislava 1978. ISBN 63-314-78.
- [5] NEBORÁK, I. *Mechatronické systémy*. Ostrava 2009. Skripta VŠB
- [6] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony – příručka techniky, volby a užití vybraných druhů* BEN – technická literatura, 2004, ISBN 80-7300-092-X
- [7] TKOTZ, K. *Fachkunde Elektrotechnik.*. Německo 2002. ISBN 80-86706-13-3.
- [8] VONDRÁŠEK, F. *Výkonová elektronika. Svazek 2 – Měniče s vnější komunikací.*. Plzeň 1994. ISBN 80-7082-137-X
- [9] VONDRÁŠEK, F. *Výkonová elektronika. Svazek 3 – Měniče s vlastní komutací a bez komutace.*. Plzeň 1998. ISBN 80-7082-485-9
- [10] EMOTOR *Asynchronní elektromotor třífázový* [online]. [cit. 29.4 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-jednofazovy.htm>>.
- [11] FYZWEB *Elektromotor* [online]. [cit. 30.3 2013]. Dostupné z URL: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=90&id_casti=31>.
- [12] POHONNÁ TECHNIKA *Princip - Synchronní motor* [online]. [cit. 30.3 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/synchronni-motor>>.